

UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI – UNIVATES
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**INTEGRAÇÃO DE DIFERENTES FERRAMENTAS PARA O ESTUDO
DO COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO EM MATERIAIS
MACIOS SINTERIZADOS APLICADOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Mateus Vorpapel

Lajeado, dezembro de 2017

Mateus Vorpapel

**INTEGRAÇÃO DE DIFERENTES FERRAMENTAS PARA O ESTUDO
DO COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO EM MATERIAIS
MACIOS SINTERIZADOS APLICADOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado ao Centro de Ciências Exatas e
Tecnológicas da Universidade do Vale do Taquari
– Univates, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de bacharel em Engenharia
Elétrica.

Área de Concentração: Conversão de
Energia, Eletromagnetismo e Máquinas Elétricas.

Orientador: Prof. Dr. Ederson Pereira Madruga

Lajeado, dezembro de 2017

Mateus Vorpapel

**INTEGRAÇÃO DE DIFERENTES FERRAMENTAS PARA O ESTUDO
DO COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO EM MATERIAIS
MACIOS SINTERIZADOS APLICADOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS**

A banca examinadora aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, na linha de formação específica em Engenharia Elétrica, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica:

Prof. Dr. Ederson Pereira Madruga – Orientador
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Me. Anderson Giacomolli
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Me. Yuri Solis Stypulkowski
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado, 08 de dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois é ele quem me deu a força, a determinação e a coragem para superar todas as dificuldades durante esta importante etapa de minha vida, me guiando e me protegendo todos os dias para que eu chegasse com êxito até o final deste curso.

Da mesma forma agradeço aos meus pais, Leomar Vorpapel e Ilaine Luci Bruch, por todo apoio incondicional, incentivando e ajudando nas horas mais difíceis, sempre prontos para auxiliar no que fosse preciso.

Ao meu orientador, professor Dr. Ederson Madruga, pela orientação, apoio e dedicação, não apenas a este trabalho, mas também durante todo o curso.

Aos professores Me. Jaime Back e Dr. Juliano Schirmbeck, pelo suporte técnico prestado durante o trabalho.

Ao meu amigo Rian Oliveira Barbosa por todo seu apoio, me emprestando seu conhecimento e dedicação para me ajudar nas minhas dificuldades.

A Universidade do Vale do Taquari – Univates, onde destaco os funcionários da Sala de Apoio dos Laboratórios de Engenharia, que sempre forneceram os recursos necessários para realização deste projeto.

A todos os demais familiares, amigos e professores que de alguma forma contribuíram para que este trabalho fosse possível de ser realizado e contribuíram para minha caminhada.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar a integração de diferentes ferramentas para o estudo do comportamento eletromagnético em materiais macios sinterizados, que são aplicados em máquinas elétricas, como motores e transformadores. Através da utilização do *software* LabVIEW, desenvolveu-se um aplicativo de instrumentação virtual capaz de analisar as curvas de histerese de diferentes materiais eletromagnéticos, como núcleos de transformadores sinterizados. Este aplicativo foi utilizado para fazer uma análise de diferentes materiais, onde comparou-se o comportamento de cada um. Para desenvolvimento deste projeto utilizou-se uma placa modelo PCIE-6341 em conjunto com um módulo de entradas e saídas SCB-68, do fabricante da National Instruments. Para complementar, realizou-se simulações dos materiais nos *softwares* FEMM 4.2 e PSIM 9.0, para determinação dos campos magnéticos e levantamento das curvas de histerese. Para validação da proposta, comparou-se as curvas de histerese e os valores de campo magnético e densidade de fluxo magnético dos materiais testados pelo aplicativo desenvolvido no LabVIEW, com o Traçador de Curvas de Histerese da GLOBALMAG, modelo TLMP-FLX-D, e os resultados encontrados nos *softwares* FEMM 4.2 e PSIM 9.0.

Palavras-Chave: Máquinas elétricas, Transformadores, Curva de histerese, Instrumentação virtual.

ABSTRACT

The present work aims to present the integration of different tools for the study of the electromagnetic behavior in soft sintered materials, which are applied in electric machines, such as motors and transformers. Through the use of LabVIEW *software*, a virtual instrumentation application was developed to analyze the hysteresis curves of different electromagnetic materials, such as cores of sintered transformers. This application was used to make an analysis of different materials, where the behavior of each one was compared. For the development of this project, a PCIe-6341 model was used in conjunction with a National Instruments manufacturer's SCB-68 input and output module. In addition, simulations of the materials in the FEMM 4.2 and PSIM 9.0 *software* were carried out to determine the magnetic fields and survey the hysteresis curves. To validate the proposal, we compared the hysteresis curves and the magnetic field values and magnetic flux density of the materials tested by the LabVIEW application with the GLOBALMAG Hatching Curve Tracer, model TLMP-FLX-D, and the results found in the *software* FEMM 4.2 and PSIM 9.0.

Keywords: Electric machines, Transformers, Hysteresis curve, Virtual instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plataforma de instrumentação virtual	14
Figura 2 – Espira de corrente com forma retangular em um campo uniforme B	19
Figura 3 – Curva de Histerese B x H.....	21
Figura 4 – (a) Anel de Rowland, (b) Circuito com Anel de Rowland.....	23
Figura 5 – Representação esquemática do processo de M/P	24
Figura 6 – (a) Sinterização por fase sólida, (b) Sinterização por fase líquida	25
Figura 7 - Curvas de magnetização e ciclos de histerese dos materiais (a) moles e (b) duros .	26
Figura 8 - Estrutura básica de um transformador	29
Figura 9 – Variáveis de entrada e saída do FEMM	32
Figura 10 - (a) Tela de programação, (b) Resultado da programação	33
Figura 11 – Oscilador de onda quadrada simulado no Software PSIM.....	34
Figura 12 – Resultado da simulação do oscilador de onda quadrada no Software PSIM	34
Figura 13 – Fluxograma do processo de análise do material	36
Figura 14 - Esquemático do anel de Rowland.....	37
Figura 15 – Circuito equivalente de ligação do anel de Rowland	38
Figura 16 – Esquemático do circuito eletrônico	40
Figura 17 – Esquemático das ligações das trilhas da placa de circuito impresso:.....	41
Figura 18 - Placa de circuito impresso soldada com seus respectivos componentes	41
Figura 19 – Projeto montado em gabinete de madeira	42
Figura 20 - Placa de aquisição de dados modelo PCIE-6341	43
Figura 21 - Bloco de entradas e saídas modelo SC - 68.....	44
Figura 22 – Bloco de entradas e saídas	44
Figura 23 - Esquema de ligação do módulo SCB-68	45
Figura 24 – Aplicativo Histeresímetro	46

Figura 25- Intensidade do campo magnético aplicado anel de Rowland	48
Figura 26 - Curva de saturação do material com seus coeficientes	49
Figura 27 – Esquemático do circuito montado.....	50
Figura 28 – Curva de histerese obtida	50
Figura 29 - Equipamento GLOBALMAG, modelo TLMP-FLX-D.....	51
Figura 30 – Tela do aplicativo Histeresímetro para material 1	53
Figura 31 – Curva comparativa do material 1	54
Figura 32 – Comportamento do material 1 para H.....	56
Figura 33 – Comportamento do material 1 para B	56
Figura 34 – Esquemático do circuito no PSIM do material 1	58
Figura 35 – Curva de histerese material 1 obtida no PSIM.....	58
Figura 36 - Curva dos sinais do primário e secundário do material 1 obtida no PSIM.....	59
Figura 37 - Curva comparativa do material 2.....	60
Figura 38 - Curva comparativa do material 3	62
Figura 39 – Representação esquemática do SMC	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos motores síncronos.....	31
Tabela 2 – Compartivo de B x H do material 1	55
Tabela 3 – Compartivo de B x H do material 2.....	61
Tabela 4 – Compartivo de B x H do material 3	63

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLO E SIGLAS

A	Ampère
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
B	Densidade de fluxo magnético
Bs	Magnetização de saturação
C	Capacitor
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
esp	Espira
F	Farad
f	Frequência
FEM	Força eletromotriz
FEMM	<i>Finite Element Method Magnetics</i>
H	Henry
Hef	Intensidade do campo magnético eficaz
Hz	Hertz
I	Corrente elétrica
J	Densidade de corrente elétrica
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
m	Metro
M/P	Metalurgia do Pó
μ	Micro
mm	Milímetro
N	Newton
P	Potência
SMC	<i>Soft Magnetic Composites</i>

V	Volt
T	Tesla
w	Diâmetro da circunferência do anel
Wb	Weber
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS GERAIS	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	16
2	REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO	18
2.1	ELETROMAGNETISMO	18
2.2	CONJUGADO NOS DIPOLOS MAGNÉTICOS	18
2.2.1	CURVA DE HISTERESE E PONTO DE CURIE	20
2.2.2	RELUTÂNCIA E FORÇA MAGNETOMOTRIZ (FMM)	21
2.3	MEDIÇÕES MAGNÉTICAS COM ANEL DE ROWLAND	22
2.4	MATERIAIS MAGNÉTICOS SINTERIZADOS PRODUZIDOS POR M/P.....	24
2.4.1	MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES E DUROS	25
2.5	APLICAÇÕES NA INDÚSTRIA.....	27
2.5.1	TRANSFORMADORES.....	27
2.5.1.1	TRANSFORMADORES DE BAIXA TENSÃO.....	28
2.5.1.2	TRANSFORMADORES ALTA TENSÃO	29
2.5.2	MOTORES ELÉTRICOS	29
2.5.2.1	MOTORES CC	29
2.5.2.2	MOTORES CA	30
2.6	SOFTWARE FEMM.....	31
2.7	SOFTWARE LABVIEW	32
2.8	SOFTWARE PSIM	33

3	METODOLOGIA.....	36
3.1	DEDUÇÃO DAS EQUAÇÕES ENVOLVIDAS NA CURVA DE HISTERESE .	37
3.2	PROJETO DO CIRCUITO ELETRÔNICO.....	39
3.3	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO LABVIEW	42
3.3.1	PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	42
3.3.2	BLOCO DE ENTRADAS E SAÍDAS.....	43
3.4	FUNCIONAMENTO DO APLICATIVO	45
3.5	FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE FEMM	47
3.6	FUNCIONAMENTO DO SOFTWARE PSIM.....	48
3.7	VALIDAÇÃO DA PROPOSTA	51
4	RESULTADOS	52
4.1	MATERIAL 1	52
4.2	MATERIAL 2	59
4.3	MATERIAL 3	61
5	CONCLUSÃO.....	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
	APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE BLOCOS DESENVOLVIDOS NO LABVIEW	70
	APÊNDICE B – MATERIAL SMC.....	72

1 INTRODUÇÃO

Buscando novos materiais e aplicações, pesquisadores vem desenvolvendo e produzindo materiais magnéticos de baixo custo, que atendam as características mínimas necessárias para serem utilizados em máquinas elétricas. Para conseguir resultados satisfatórios, vem sendo testadas diferentes ligas metálicas, a fim de substituir os materiais mais comuns utilizados em máquinas elétricas. (RONCHI, 2015)

Dentre os materiais estudados estão os materiais amorfos, materiais compósitos magnéticos macios e materiais nanocristalinos. O processo que se busca estudar é o Processo de Fabricação por Metalurgia do Pó (M/P). Este processo busca desenvolver novas ligas de materiais que apresentem maior rendimento, eficiência e menor custo de fabricação de máquinas elétricas. O processo de M/P envolve as etapas de preparação da liga, moagem, compactação e sinterização. Seu custo é inferior, quando comparado com outros processos de fabricação, como por exemplo, chapas laminadas. (LUNA, 2012; CERVA, 2014; RONCHI, 2015)

Segundo Dias (2005), estudos apontam que os materiais magnéticos sinterizados podem ser aproveitados para construir núcleos de máquinas elétricas, como motores e transformadores. Desta forma, as ligas de materiais magnéticos macios, que são constituídas de misturas de pós de ferro com fósforo, silício ou níquel seriam aplicadas em máquinas elétricas de núcleos maciços, substituindo as chapas de aço laminadas.

Para analisar o comportamento destes materiais, desenvolveu-se um aplicativo de instrumentação virtual no *software* LabVIEW, capaz de medir curvas de histerese. Segundo NATIONAL INSTRUMENTS (Nov., 2009), para criação de um instrumento virtual, se faz necessário um programa que gerencie a comunicação entre a máquina e o usuário. O LabVIEW permite que o usuário desenvolva aplicações personalizadas para um determinado fim, utilizando programação gráfica.

Para este trabalho desenvolveu-se uma plataforma de instrumentação virtual, capaz de medir curvas de histerese, que substitui equipamentos como o histeresímetro e o magnetizador, entre outros existentes no mercado para este fim. Enquanto que o equipamento desenvolvido possui uma plataforma de instrumentação virtual desenvolvida dentro do LabVIEW, os equipamentos comerciais utilizam plataformas próprias. Neste projeto, utilizou-se a placa de aquisição de dados PCIe-4361 e o bloco de entradas e saídas SCB-68 da National Instrument. A Figura 1 apresenta esta plataforma de instrumentação virtual.

Figura 1 - Plataforma de instrumentação virtual



Fonte: Adaptado de BARBOSA (2016).

O circuito com o material a ser estudado foi montado em Placa de Circuito Impresso, sendo ligado no bloco de entradas e saídas SCB-68, que foi conectado no computador com LabVIEW através da placa de aquisição de dados PCIe-6341. Os instrumentos virtuais, além de possuírem funcionalidades semelhantes aos reais, ainda dão ao usuário a possibilidade de personalização e expansão de suas pesquisas.

De acordo com Ferreira (2008) e Pieckzkoski (2015), o *software* é uma parte importante da instrumentação virtual. Com a ferramenta correta, os pesquisadores conseguem trabalhar de forma eficiente, através da criação de suas próprias aplicações.

Além do LabVIEW, utiliza-se o *software* de simulação através de metodologia de elementos finitos, FEMM 4.2, e o *software* de simulação de circuitos eletrônicos, PSIM 9.0, para determinação dos campos magnéticos dos materiais estudados e levantamento das curvas de histerese. Utilizar *softwares* simuladores, como FEMM e PSIM, é considerado uma

alternativa na falta de equipamentos, geralmente de valor e custo elevado, como um histeresímetro ou um magnetizador.

Para validação da proposta, comparou-se as curvas de histerese e os valores de campo magnético e densidade de fluxo magnético dos materiais testados pelo aplicativo desenvolvido no LabVIEW, com o Traçador de Curvas de Histerese da GLOBALMAG, modelo TLMP-FLX-D, e os resultados encontrados nos *softwares* FEMM 4.2 e PSIM 9.0.

1.1 Objetivos gerais

O principal objetivo desta pesquisa foi realizar um estudo do comportamento eletromagnético de diferentes tipos de materiais macios sinterizados, que são utilizados em núcleos de máquinas elétricas, como motores e transformadores. Dentre os aspectos mais importantes que são avaliados para cada material estão as curvas de histerese, sendo as grandezas analisadas como densidade de fluxo magnético e intensidade do campo magnético.

1.2 Objetivos específicos

O trabalho foi conduzido teórica e experimentalmente, e além do estudo e da análise de diferentes materiais macios sinterizados, realizaram-se os seguintes objetivos específicos:

- Levantamento dos dados de campo magnético e densidade magnética, dos materiais estudados, afim de determinar a Curva de Histerese, com a ajuda do Traçador de Curvas de Histerese da GLOBALMAG, modelo TLMP-FLX-D;
- Desenvolvimento de um aplicativo no LabVIEW capaz de analisar as curvas de histerese de um material macio sinterizado;
- Desenvolvimento de um *hardware* para amplificar os sinais enviados (gerador) e recebidos (osciloscópio) pelo LabVIEW. Este circuito foi composto por três módulos de amplificadores *push pull* de baixa frequência, três amplificadores operacionais no primário, utilizando-se a configuração diferenciadora, inversora e integradora, e um circuito com amplificador operacional para ler as distorções geradas no anel de *Rowland*;

- Análise numérica das características dos circuitos magnéticos do material estudado, sobre a ótica dos compostos magnéticos, com o intuito de verificar não linearidades e suas características eletromagnéticas. Para tal, utilizou-se os *softwares* FEMM 4.2 e PSIM 9.0 para analisar o comportamento do material em estudo;
- Comparação dos comportamentos eletromagnéticos de diferentes materiais macios sinterizados;
- Validação do aplicativo desenvolvido no LabVIEW, utilizando o Traçador de Curvas de Histerse da GLOBALMAG, modelo TLMP-FLX-D, comparando os dados obtidos pelo aplicativo com os do equipamento comercial.

1.3 Justificativa do trabalho

Com a dificuldade de analisar fenômenos eletromagnéticos em materiais macios sinterizados, que posteriormente são aplicados em máquinas elétricas, buscou-se desenvolver ferramentas alternativas de instrumentação virtual para executar esta análise. Para Lopes (2007) e Moraes et al (2014), a grande vantagem trazida pela instrumentação virtual é a redução de custo e espaço físico. Enquanto que seriam necessários diversos equipamentos caros e volumosos como histeresímetro, magnetizador, osciloscópio, gerador de sinais, entre outros, com a instrumentação virtual os únicos equipamentos necessários são o computador integrado com uma placa de captura de dados e uma placa de entradas e saídas ligada ao circuito de testes.

Neste contexto, os materiais macios sinterizados (produzidos por M/P), que foram testados neste trabalho, são alvo de diferentes estudos para sua futura aplicação em máquinas elétricas. Segundo Ferreira (2011), a partir da M/P é possível construir núcleos de transformadores em blocos maciços que possuem alta permeabilidade magnética e resistividade elétrica, reduzindo dessa forma as correntes parasitas. Isto resultaria em equipamentos mais eficientes.

Para Ferreira (2011), as maiores vantagens de se utilizar materiais sinterizados são o número reduzido de etapas no processo de fabricação dos núcleos, resultando em menor gasto de energia no processo de fabricação, além da matéria prima ser de menor custo comparada a chapas laminadas. Os núcleos possuem alta resistividade elétrica, o que diminui as correntes parasitas, conseqüentemente, aumenta a eficiência energética. Estes núcleos também são mais leves comparados aos de chapas laminadas.

Os capítulos seguintes estão organizados da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre eletromagnetismo, curva de histerese, materiais sinterizados produzidos por M/P, materiais moles e duros, materiais magnéticos compósitos, transformadores de baixa e alta tensão, motores elétricos de corrente contínua e alternada, FEMM, LabVIEW e PSIM. O capítulo 3 apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da plataforma de instrumentação virtual, como funcionamento do *hardware* utilizado para ler os sinais aplicados nos materiais, o funcionamento do *software* de instrumentação virtual e dos simuladores FEMM e PSIM. O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos neste trabalho, como as curvas de histerese e comportamento de cada material. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do projeto.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

Neste capítulo de fundamentação teórica serão apresentados todos os embasamentos teóricos necessários para compreensão do tema proposto. Serão abordados temas como eletromagnetismo, curva de histerese, materiais macios sinterizados produzidos por M/P, materiais moles e duros, transformadores de baixa e alta tensão, motores elétricos de corrente contínua e alternada, FEMM, LabVIEW e PSIM.

2.1 Eletromagnetismo

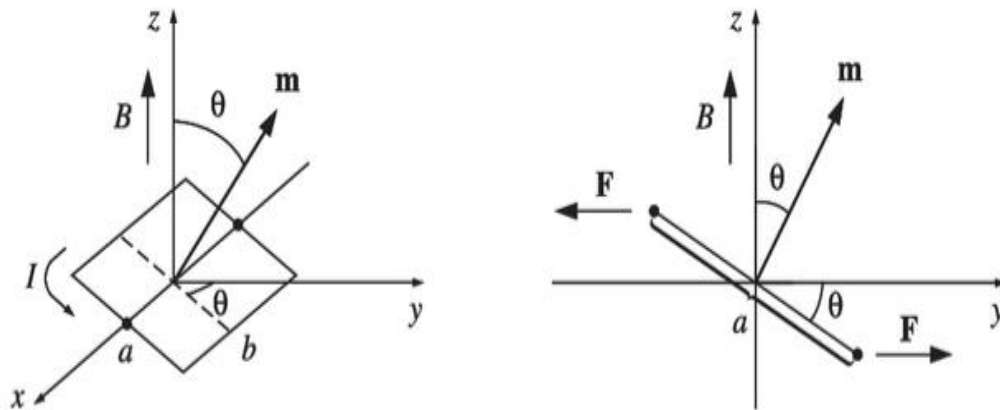
De acordo com Griffiths (2012), todos os fenômenos magnéticos são devidos às cargas elétricas que estão em movimento. Analisando uma porção microscópica de material magnético, se encontraria elétrons orbitando em volta dos núcleos e elétrons girando pelo seu próprio eixo. Quando um campo magnético é aplicado nestas espiras, ocorre o alinhamento líquido dos dipolos magnéticos e o meio se torna magnetizado. A polarização elétrica se dá na direção do campo elétrico E . Materiais que possuem magnetização paralela ao campo magnético B são chamados de paramagnéticos. Já materiais que possuem magnetização contrária ao campo magnético B são chamados de ferromagnéticos. Segundo Hillebrands e Ounadjela (2002), o campo magnético quando aplicado em um material ferromagnético, alinha seus spins eletrônicos.

2.2 Conjugado nos dipolos magnéticos

Para Griffiths (2012), o conjugado de um dipolo elétrico está para o campo elétrico, assim como o conjugado de um dipolo magnético está para um campo magnético. Para calcular o conjugado de um dipolo magnético, considera-se uma espira de corrente com forma retangular

em um campo uniforme B . A espira é centralizada na origem e inclinada a um ângulo θ do eixo z em direção ao eixo y . Dessa forma, o B aponta na direção z . A Figura 2 mostra como as forças sobre os dois lados inclinados são anuladas.

Figura 2 – Espira de corrente com forma retangular em um campo uniforme B



Fonte: Adaptado de GRIFFITHS (2012).

Tais forças tendem a esticar a espira, porém não provocam sua rotação. As forças sobre os lados horizontais são iguais e opostas e seu torque gerado é calculado pela Equação 1.

Conforme Equação 1, que representa o Torque de uma máquina elétrica (GRIFFITHS, 2012), que é calculado a partir do produto da força de um segmento α com seu ângulo θ .

$$C = \alpha F \sin \theta \hat{x} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

C Conjugado da máquina elétrica [Nm]

F Magnitude da força em um segmento da máquina elétrica [N]

A partir da Equação 2, que representa Magnitude da força de uma máquina elétrica (GRIFFITHS, 2012), calculada pela corrente I e o campo magnético B que passa em um segmento b .

$$F = IbB \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

- B Campo magnético aplicado na espira [T]
 F Magnitude da força em um segmento da máquina elétrica [N]
 I Corrente elétrica [A]

O torque para qualquer distribuição localizada de corrente em uma máquina elétrica é calculado na Equação 3, que representa Torque para qualquer distribuição localizada de corrente de uma máquina elétrica (GRIFFITHS, 2012), calculado pelo momento de dipolo magnético m e o campo magnético B .

$$C = mB \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

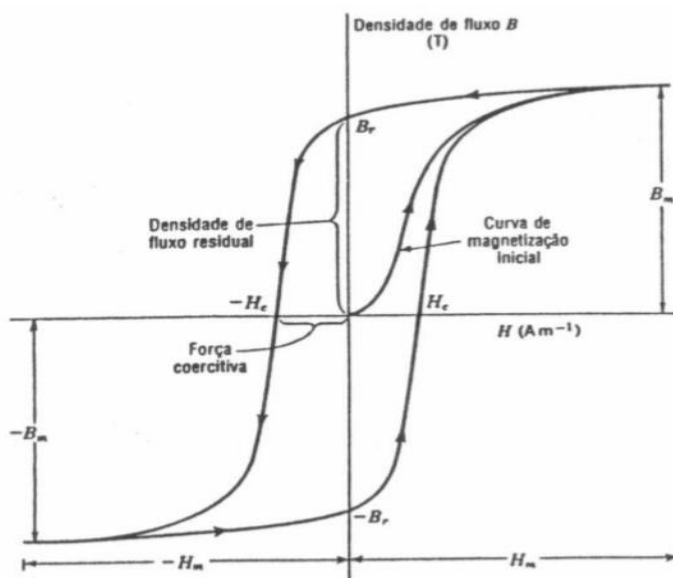
- B Campo magnético aplicado na espira [T]
 C Conjugado da máquina elétrica [Nm]
 m Momento de dipolo magnético na espira [Nm/T]

2.2.1 Curva de histerese e ponto de Curie

Temperaturas altas destroem o alinhamento paralelo dos dipolos dentro de um determinado domínio. No ferro essa temperatura é de 770°C . Abaixo dessa temperatura que é chamada de ponto de Curie, o ferro é ferromagnético, acima, ele é paramagnético. O ponto de Curie não possui transição gradual entre o comportamento ferromagnético e paramagnético. Tais mudanças são conhecidas como transição de fases. (GRIFFITHS, 2012)

Segundo Nasar (1987), a temperatura de Curie é a temperatura na qual os ímãs se desmagnetizam. Para Cullity (1967), ao colocar um material ferromagnético dentro de uma bobina em que circula corrente elétrica I , será gerado no interior desta bobina um campo magnético H , sendo que o material irá sofrer uma indução magnética B . A Figura 3 mostra a curva de histerese deste material.

Figura 3 – Curva de Histerese B x H



Fonte: Adaptado de CERVA (2014).

O ponto interceptado pela curva de histerese no eixo de B, do segundo quadrante, é conhecido como magnetismo remanescente. Tal ponto expressa a indução magnética residual que se mantém no material sem campo magnético aplicado. Nesse ponto, H é igual a zero. B_r representa o magnetismo máximo que também é conhecido por retentividade. O ponto interceptado no eixo H do referido quadrante é intitulado de força coercitiva, representando o campo magnético necessário para desmagnetizar o material. Neste ponto B é igual a zero. (CERVA, 2014).

2.2.2 Relutância e Força Magnetomotriz (FMM)

Relutância magnética é uma medida semelhante à resistência elétrica. Quanto maior for a relutância, menor será o fluxo magnético Φ . A Equação 4 calcula a relutância magnética R que é medida em ampère-espira por weber. μ é a permeabilidade magnética do meio medida em Henry por metro. l é o comprimento medido em metros. A é a área da secção transversal medida em metros quadrados. (KOSOW, 1990).

Através da Equação 4, que representa a Relutância magnética (KOSOW, 1990), que é calculada a partir da força magnetomotriz dividido pelo fluxo magnético, ou pelo comprimento dividido pelo produto da área da secção transversal pela permeabilidade magnética.

$$R = \frac{FMM}{\Phi} = \frac{l}{\mu A} \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

A Área da secção transversal [m²]

FMM Força magnetomotriz [A.e]

\Re Relutância magnética [Aesp/Wb]

Φ Fluxo magnético [Wb]

l Comprimento [m]

μ Permeabilidade magnética [H/m]

FMM é a força magnetomotriz e é calculada pela Equação 5. (FITZGERALD, 1990)

$$FMM = NI \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

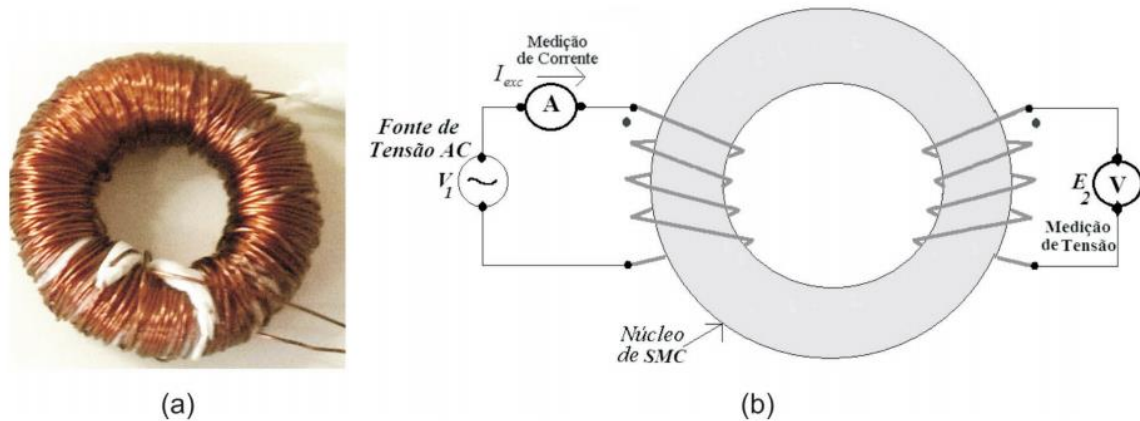
I Corrente [A]

N Número de espiras

2.3 Medições Magnéticas com Anel de Rowland

Segundo Katz (2005) e Ludke (2009) o Anel de *Rowland* consiste em um anel toroidal revestido por uma bobina magnetizadora e uma bobina sensora localizada em um dos polos do anel que serve para medir o fluxo magnético gerado no interior do anel. A corrente que passa pelas espiras do enrolamento do primário é proporcional ao campo magnético B do material. Medindo a tensão da bobina e plotando os dados em função da corrente, determina-se a curva de histerese para qualquer material ferromagnético. A Figura 4-a apresenta o anel de *Rowland* construído com material sinterizado. A Figura 4-b apresenta o circuito com anel de *Rowland* para obtenção das curvas de histerese.

Figura 4 – (a) Anel de *Rowland*, (b) Circuito com Anel de *Rowland*



Fonte: Campos (2014).

Utiliza-se um multímetro para medir a força magnetomotriz no enrolamento do secundário e um amperímetro para medir a corrente de excitação do primário. Conhecendo a frequência que é aplicada na bobina, o número de voltas do enrolamento do secundário e a área da seção do núcleo determina-se a densidade de fluxo magnético B (CAMPOS, 2014), conforme apresenta a Equação 6.

$$B = \frac{FEM}{\sqrt{2} f N_2 A} \quad \text{Eq. (6)}$$

Onde:

- A Área da seção do núcleo
- B Densidade fluxo magnético [T]
- f Frequência [Hz]
- FEM Força eletromotriz [V]
- N_2 Número de espiras do secundário

Para determinar a intensidade de campo magnético eficaz H_{ef} (CAMPOS, 2014), utiliza-se a Equação 7.

$$H_{ef} = \left(\frac{N_1 I_0}{2 \pi R} \right) \quad \text{Eq. (7)}$$

Onde:

- I_0 Corrente de excitação [A]

Hef Intensidade do campo magnético eficaz [A/m]

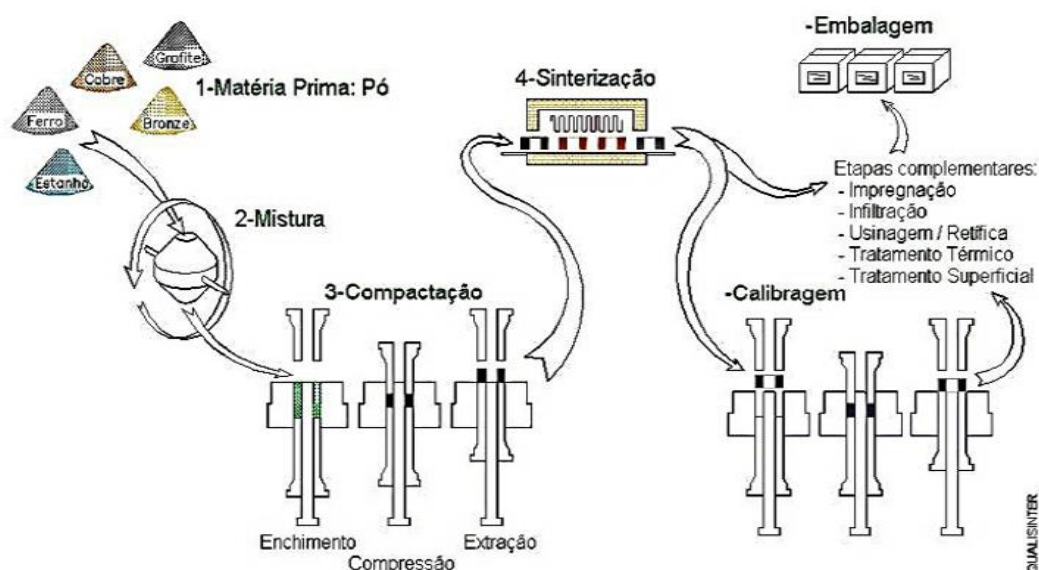
N₂ Número de espiras do primário

R Raio do anel (m)

2.4 Materiais Magnéticos Sinterizados Produzidos por M/P

Para obter materiais magnéticos sinterizados através de processos metalúrgicos utiliza-se a M/P. De acordo com Schaeffer (2008), os quatro processos básicos da M/P são: obtenção dos pós, mistura, compactação e sinterização ou cura. Em alguns casos se utiliza uma quinta etapa conhecida como retificação. Após mistura de todos os pós, os mesmos são compactados em matrizes para adquirirem a forma da cavidade da matriz. Então são colocados em fornos para sinterização onde passam a adquirir resistência mecânica e consistência. A Figura 5 apresenta a representação esquemática do processo de M/P.

Figura 5 – Representação esquemática do processo de M/P

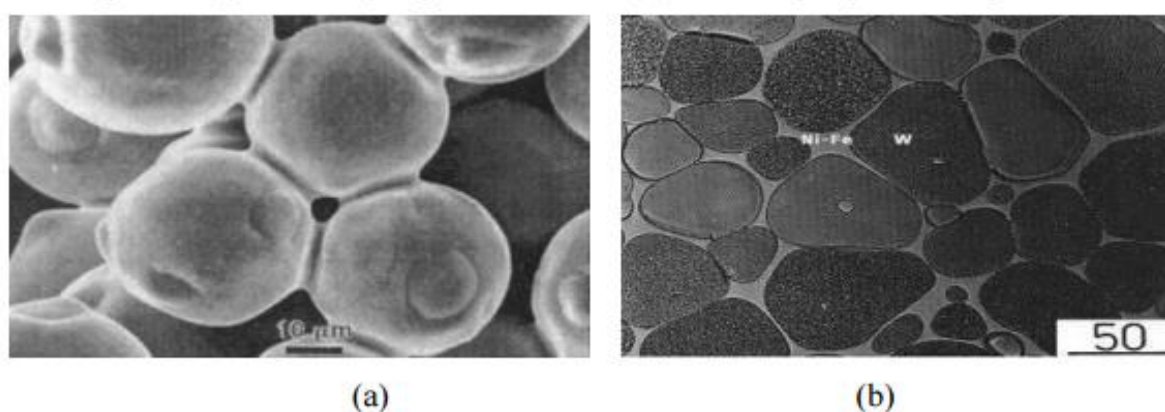


Fonte: NIADA (2015).

A escolha correta do pó depende das propriedades do material e de suas características, onde se avalia qual será a aplicação pretendida. A mistura deve assegurar a uniformidade das peças, garantindo dispersão dos constituintes, bem como forma e homogeneidade adequadas. A compactação, por sua vez, é feita a partir de prensas, gerando peças com formato final da peça a ser fabricada. (NIADA, 2015)

Segundo Bonato (2003), a etapa de sinterização consiste em realizar um tratamento térmico. Neste tratamento deve-se ter controle da temperatura, tempo, atmosfera e velocidades de aquecimento e resfriamento. É neste processo que a massa de pós altera suas características e adquire propriedades desejadas, como densidade, dureza e resistência mecânica. A Figura 6-a apresenta a sinterização por fase sólida e a Figura 6-b por fase líquida.

Figura 6 – (a) Sinterização por fase sólida, (b) Sinterização por fase líquida



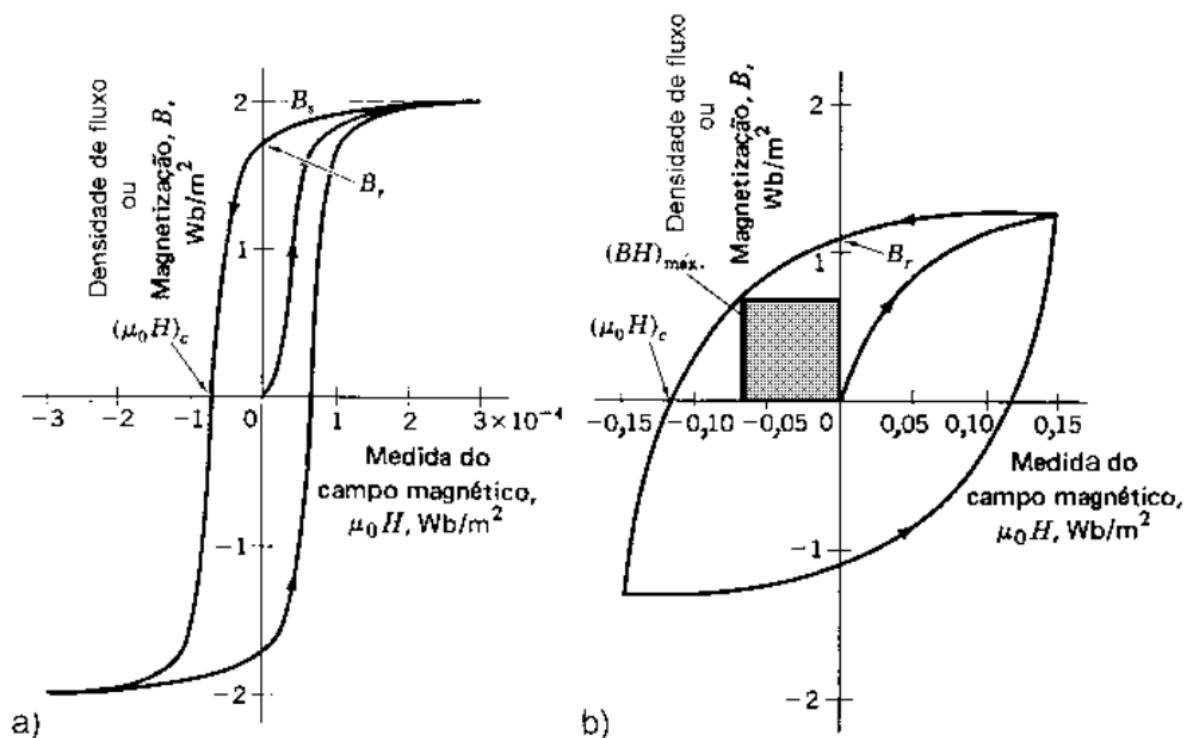
Fonte: ASM Handbook (1998).

Na fase sólida as partículas de pó são unidas por causa da temperatura que fica abaixo do ponto de fusão do material, que faz uma ligação entre suas partículas. Na fase líquida o material é sinterizado através da utilização de pontos de fusão diferentes, fazendo com que o material de menor ponto de fusão entre em estado líquido e se conecte a partícula do outro material. (BONATO, 2003)

2.4.1 Materiais Magnéticos Moles e Duros

Determina-se as propriedades magnéticas de um material a partir da sua estrutura eletrônica, cristalina e microestrutura. Os materiais magnéticos são classificados em moles ou duros. Material mole é aquele que é fácil de ser magnetizado ou desmagnetizado. Já o material duro permanece magnetizado ou é um ímã permanente. A Figura 7 apresenta curvas de magnetização e ciclos de histerese característicos desses tipos de materiais. (PADILHA, 2000)

Figura 7 - Curvas de magnetização e ciclos de histerese dos materiais (a) moles e (b) duros



Fonte: PADILHA (2000).

A Figura 7-a. apresenta a curva de magnetização e histerese para materiais magnéticos moles, enquanto que a Figura 7-b. apresenta a curva de magnetização e histerese para materiais magnéticos duros. Segundo Fitzgerald (1990), aço elétrico de grão orientado é um exemplo de material macio. Já material magnético permanente, ou ímã, é exemplo de material duro. Materiais moles possuem baixa coercitividade, enquanto que em materiais duros a coercitividade é elevada. O requisito para que um material seja considerado mole é que uma alta magnetização de saturação B_s seja produzida por um campo aplicado. O campo necessário para provocar a desmagnetização deverá ser pequeno. Dessa forma a área do ciclo de histerese e a perda de energia por ciclo são pequenas. Materiais magnéticos moles sempre operam na presença de um campo magnético.

Este tipo de comportamento é benéfico para aplicações que envolvam mudanças contínuas na direção de magnetização. Desta forma, utiliza-se materiais magnéticos moles para produção de transformadores, pois estes equipamentos têm eficiência maior se a magnetização não permanece depois que o campo zera. Para esse tipo de aplicação é recomendado utilizar materiais magnéticos moles de baixa remanência, como ferro puro e aço silício. (PADILHA, 2000)

Materiais magnéticos duros são utilizados em ímãs permanentes e devem ter resistência a desmagnetização. Analisando o comportamento da curva de histerese da Figura 7-b conclui-se que esse material tem uma elevada remanência, coercitividade e densidade de fluxo de saturação, baixa permeabilidade inicial e altas perdas de energia por histerese. Possuindo histerese larga, o material apresenta dificuldade em movimentar as paredes de domínio, impedindo a movimentação destas paredes o material eleva sua coercitividade e diminui sua susceptibilidade, assim necessitando de altos valores de campo para desmagnetizar o material. (CALLISTER, 2007)

2.5 Aplicações na indústria

2.5.1 Transformadores

O estudo de transformadores e outros dispositivos elétricos se direciona para o início da pesquisa em fenômenos magnéticos e atualmente é alvo de diversos estudos. (NOGUEIRA; PEREIRA JR, 2006)

Para Nasar (1987), transformadores são dispositivos eletromagnéticos que possuem duas ou mais bobinas acopladas através de um fluxo mútuo. Um transformador é considerado ideal quando o seu núcleo possui permeabilidade infinita e sem perdas, seus enrolamentos também não possuem perdas e não apresenta fluxo de dispersão.

Segundo Tichlen (2011), transformadores são definidos para serem usados em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Para o autor cada transformador é projetado para cada situação. Transformadores de distribuição operam em média e baixa tensão (13,8 kV/380 V). Já transformadores de transmissão, operam em média e alta tensão (13,8 kV/138 kV). Para cada situação utiliza-se um transformador diferente.

Para Say (1983), transformadores são dispositivos que a partir de uma excitação possuem respostas que necessitam da frequência de trabalho e de fenômenos não lineares. Esses fenômenos são devidos aos materiais ferromagnéticos que possuem propriedades como a saturação e a histerese magnética. Os causadores destes efeitos são as correntes induzidas nas laminações, denominadas de corrente de Foucault. Para modelagem do núcleo, deve-se incluir o efeito da não linearidade e a influência da frequência. As técnicas numéricas para analisar

esses fenômenos são objetos de muitas pesquisas, que incluem aprofundamento teórico e diversos estudos voltados para a criação de projetos de equipamentos elétricos.

Para Stoll (1974), as técnicas para incluir os efeitos das correntes de Foucault, são baseadas na solução da equação de difusão de correntes, utilizando técnicas de elementos finitos. Já para inclusão da histerese magnética, se utiliza modelos baseados no alinhamento de domínios magnéticos.

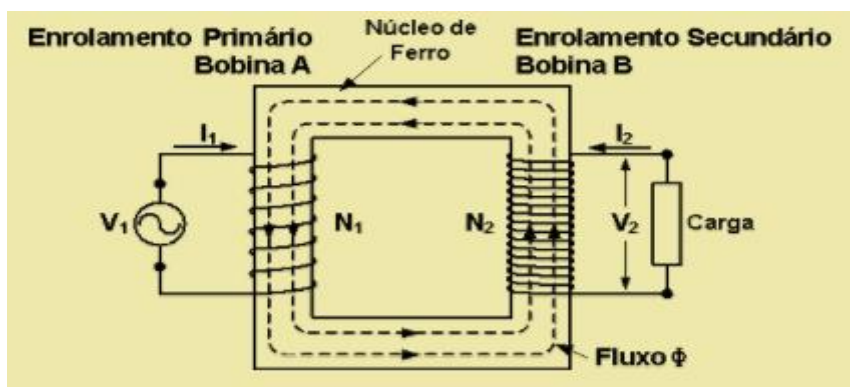
Para se estudar profundamente a histerese aplicada em um transformador, primeiramente, deve-se colocar o transformador operando a vazio. Quando o enrolamento do primário do transformador é energizado por uma fonte de corrente ajustada, de forma que a corrente magnetizante varie e retorne um valor positivo, a relação entre a intensidade (B) e a densidade (H) do campo magnético são representadas por uma característica cíclica, conhecida como laço de histerese. (NOGUEIRA; PEREIRA JR, 2006)

Os transformadores podem ser divididos em transformadores de baixa tensão e alta tensão, cada um utilizado para uma aplicação diferente.

2.5.1.1 Transformadores de baixa tensão

Os transformadores de baixa tensão possuem dois componentes principais, o enrolamento e o núcleo. No enrolamento existem várias bobinas que são constituídas de cobre revestido de verniz sintético, que serve como isolante. O núcleo é constituído de material ferromagnético e é o responsável por transferir corrente induzida no enrolamento primário para o secundário. Estes transformadores costumam trabalhar em tensões de até 220 Volts. A Figura 8 apresenta a estrutura básica de um transformador. A razão entre tensão enrolamento primário com o secundário é análogo a razão entre o número de espiras do primário com o secundário. NASAR (1987)

Figura 8 - Estrutura básica de um transformador



Fonte: Adaptado de Nasar (1987).

2.5.1.2 Transformadores alta tensão

Existem dois tipos de transformadores de alta tensão, os transformadores elevadores de tensão, que recebem a energia elétrica de uma central geradora e repassa para uma rede de transmissão, e os transformadores abaixadores de tensão, que reduzem a tensão para poder ser utilizada em residências, estabelecimentos e afins. (GUSSOW, 1990; TICHLEN, 2009)

2.5.2 Motores elétricos

Os motores elétricos são classificados em motores de Corrente Contínua (CC) e motores de Corrente Alternada (CA).

2.5.2.1 Motores CC

Os motores de corrente contínua são classificados pelo tipo de ligação dos enrolamentos de campo. Eles são divididos em motor de ímã permanente, campo série, campo paralelo, excitação independente e composto. Sua principal diferença é a maneira como é produzida a excitação do campo polar. (ELETROBRAS, 2009)

Segundo Bim (2014), motores de ímã permanente possuem um ímã estacionário no estator no lugar do enrolamento de campo, resultando em uma construção mais simples. Esse tipo de motor é de baixa potência, podendo ser utilizado como geradores de corrente contínua.

Motores de campo série, possuem bobinas de campo constituídas de espiras ligadas em série com o enrolamento. Por possuir elevada corrente de armadura, o condutor deve ter uma área maior para suportar a corrente que circula. O conjugado deste motor é proporcional ao quadrado da corrente de armadura. Estes motores são recomendados em aplicações que requerem partidas em plena carga. (FITZGERALD, 1990)

Os motores de campo paralelo são os mais comuns dos motores CC. Possuem enrolamentos de campo ligados em paralelo com o induzido, fazendo com que sua corrente de campo dependa da tensão de armadura. Este tipo de motor é recomendado para aplicações que não necessitem de partidas a plena carga. (BIM, 2014)

Os motores de excitação independente necessitam de duas fontes de alimentação. Uma para alimentar o enrolamento de campo e outra para alimentar a armadura. Para controlar a velocidade e torque destes motores deve-se controlar a tensão na armadura, controlar a tensão do campo ou adicionar uma resistência na armadura. (ELETROBRAS, 2009)

O motor composto é constituído de enrolamentos série e paralelo. Estes dois enrolamentos são montados na mesma sapata polar. Este motor é utilizado para diversos fins, pois possui torque de partida superior a um motor de derivação e uma velocidade estável em qualquer nível de carga. (GUSSOW, 1990)

2.5.2.2 Motores CA

Os motores de corrente alternada são classificados em motores síncronos e motores assíncronos. Nos motores síncronos, a velocidade de rotação é proporcional a frequência de rotação, já nos motores assíncronos, também chamados de motores de indução, o rotor é excitado pelo estator e a velocidade de rotação não é proporcional a rotação. (BIM, 2014; ELETROBRAS, 2009)

O motor síncrono é composto pelo estator, onde encontra-se um conjunto de bobinas alimentadas por corrente alternada; rotor, que possui um conjunto de bobinas alimentadas por corrente contínua, formando assim os polos; escovas, que ficam fixadas no porta-escovas preso no estator. A Tabela 1 apresenta as principais vantagens e desvantagens deste motor. Destaca-se como principal desvantagem o alto custo de fabricação deste motor comparado a motor de indução. (SAY, 1983; NASAR, 1987; ELETROBRAS, 2009; BIM, 2014)

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens dos motores síncronos

Motor síncrono	
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> Fácil controle do fator de potência por meio da excitação de campo, podendo operar com fator de potência capacitivo, unitário ou indutivo. Assim, além da potência mecânica disponibilizada no eixo, o motor síncrono pode auxiliar na correção do fator de potência. Mais econômico em elevadas potências e baixas velocidades. Bom rendimento, mesmo trabalhando com carga parcial. Menor peso (do que o seu equivalente de indução) para baixas velocidades. Rotação rigorosamente constante com a frequência de alimentação. 	<ul style="list-style-type: none"> Alto custo de aquisição. Fabricação somente sob encomenda. Cuidados especiais devem ser dedicados ao enrolamento de campo na partida e na sincronização com a rede. O enrolamento de campo no rotor necessita de corrente contínua. Na maioria das vezes, possui elevada inércia, o que dificulta sua colocação em operação. Exige mais manutenção do que os motores de indução. Utilizado somente para grandes potências.

Fonte: ELETROBRAS (2009).

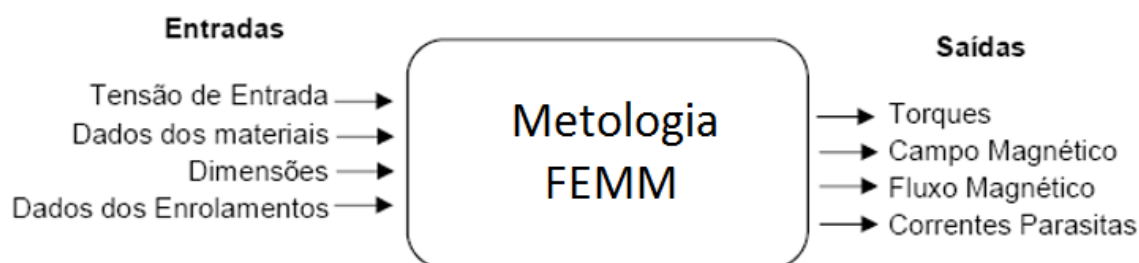
O motor assíncrono gira em velocidade diferente da velocidade síncrona, porém essas duas são próximas. No Brasil essa velocidade é de 60 vezes por segundo. As principais partes deste motor é o estator, onde se encontram as bobinas de campo, e o rotor que pode ser gaiola de esquilo ou bobinado. No rotor gaiola de esquilo, a magnetização do núcleo é feita pelo escorregamento do campo, já no bobinado o método de partida se dá através da variação da resistência do rotor. O rotor bobinado consegue partir mais carga em inércia, porém devido a seu alto custo de construção atualmente está em desuso. (NASAR, 1987)

2.6 Software FEMM

O principal objetivo da metodologia de elementos finitos é solucionar equações diferenciais para diversos tipos de entradas. Ao dividir o problema em um grande número de regiões em formato de triângulos com áreas conhecidas, acaba-se deixando o problema com resolução mais simples. O problema de álgebra linear com milhares de variáveis é formado a partir do processo de discretização. O *software* FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*)

é composto por um conjunto de programas capaz de resolver problemas de baixa frequência eletromagnética com planos bidimensionais com simetria axial. A Figura 9 apresenta as variáveis de entrada e saída do aplicativo. (SCHAEFFER, 2008; CERVA, 2014; DIAS, 2014)

Figura 9 – Variáveis de entrada e saída do FEMM



Fonte: Adaptado de SCHAEFFER (2008).

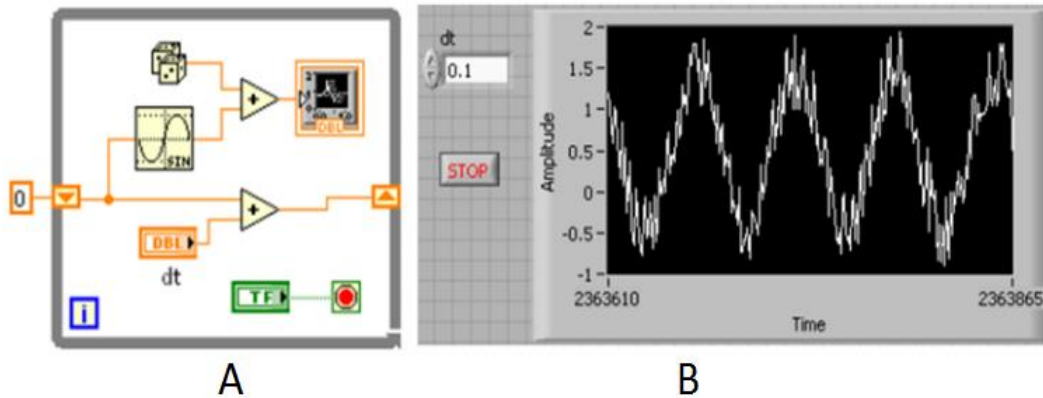
O programa é dividido em *Iterative Shell*, *Triangle.exe*, *Solvers*. A primeira é uma interface múltipla com pré e pós processamento para diversos tipos de problemas. Essa parte contém uma interface CAD (*Computer Aided Designed*) responsável por definir as propriedades do material e as condições de limite. A segunda é responsável por dividir a região a ser solucionada em um grande número de triângulos com áreas conhecidas, possibilitando a resolução do problema por elementos finitos. A última é um algoritmo capaz de resolver problemas magnéticos e eletroestáticos. Cada parte utiliza os dados pré-configurados resolvendo as equações diferenciais de Maxwell obtendo os valores desejados. (SCHAEFFER, 2008; CERVA, 2014; DIAS, 2014)

2.7 Software LabVIEW

O LabVIEW é um *software* que trabalha com linguagem de programação gráfica, conhecida como linguagem G. Ele é recomendado para criação de aplicações flexíveis e sofisticadas de instrumentos que atendam um determinado projeto de pesquisa. Ele permite que se desenvolva aplicações alimentadas com sinais reais, analisando e visualizando dados, criando e prototipando algoritmos, integrando diferentes bibliotecas e linguagens de programação textuais, implementando a aplicação final através de tecnologia disponível no mercado. Tudo isso de forma rápida e com baixo custo de desenvolvimento. A Figura 10-a apresenta a tela de programação G, baseada em blocos de programação. A Figura 10-b apresenta

o resultado desta programação que é apresentada ao usuário que irá executar o projeto. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012)

Figura 10 - (a) Tela de programação, (b) Resultado da programação



Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS (2012).

O LabVIEW possui uma extensa biblioteca capaz de processar sinais e analisar dados. As principais funcionalidades do programa são ajustes de curvas, interpolação e extrapolação, otimização, álgebra linear, probabilidade e estatística, solucionar equações diferenciais, processamento de sinais analógicos e digitais, integração e diferenciação. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012)

Segundo National Instruments (2007), o LabVIEW é ideal para construir instrumentos virtuais porque fornece um ambiente de desenvolvimento de projetos de fácil utilização, permitindo que o projetista consiga facilmente operar o programa de instrumentação, controlar o *hardware* selecionado, analisar os dados adquiridos e exibir os resultados desejados. A ferramenta permite que o projetista personalize cada painel com botões, knobs, seletores, gráficos, deixando a aplicação fácil de ser visualizada e interativa.

2.8 Software PSIM

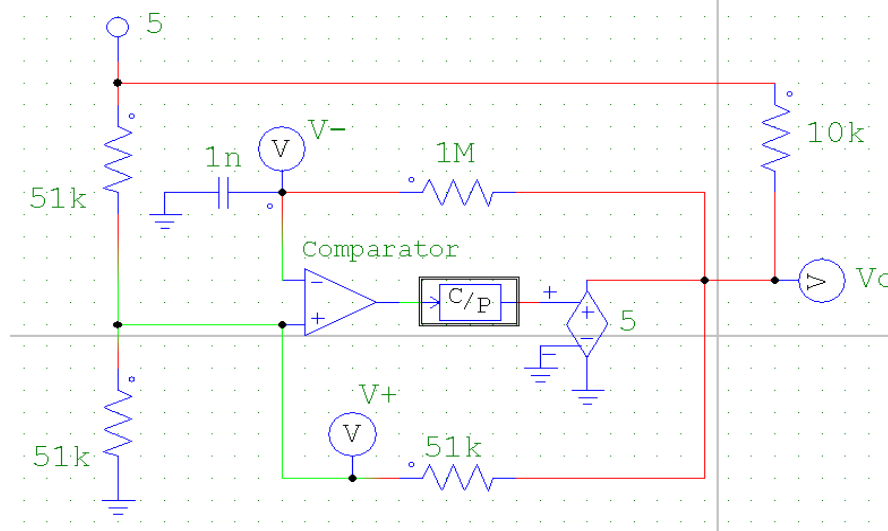
De acordo com PSIM (2006) e Gomes (2012), o PSIM é um *software* de simulação capaz de analisar uma forma de onda semelhante a apresentada em uma tela de osciloscópio. Este *software* é muito utilizado para analisar malhas de controle, amplificadores analógicos e digitais, curvas de histerese, entre tantos outros. Este simulador pode ser utilizado em

praticamente todos os circuitos analógicos e digitais existentes. Para realizar uma simulação deve-se seguir os seguintes passos:

- Criação de esquemático de um circuito a ser simulado;
- Realização da simulação;
- Análise dos resultados.

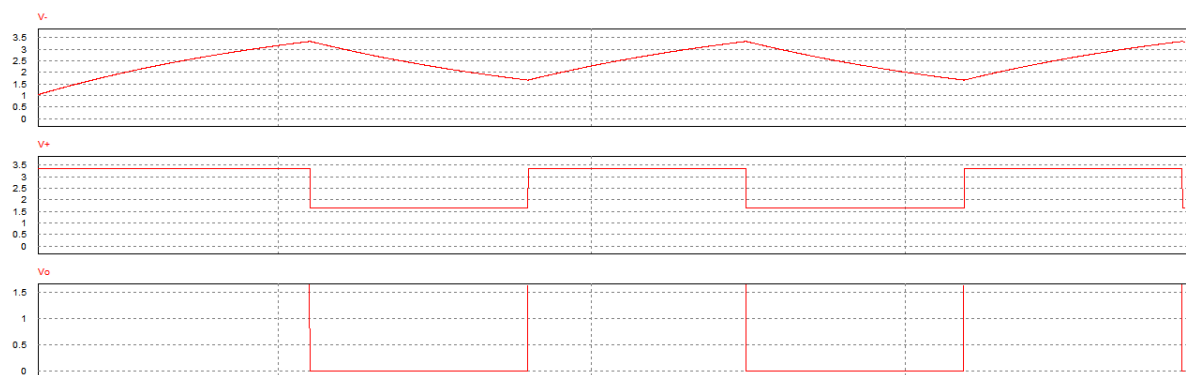
A Figura 11 apresenta um oscilador de onda quadrada simulado neste *software*. Enquanto que a Figura 12 apresenta o resultado da simulação.

Figura 11 – Oscilador de onda quadrada simulado no *Software* PSIM



Fonte: Autor (2017).

Figura 12 – Resultado da simulação do oscilador de onda quadrada no *Software* PSIM



Fonte: Autor (2017).

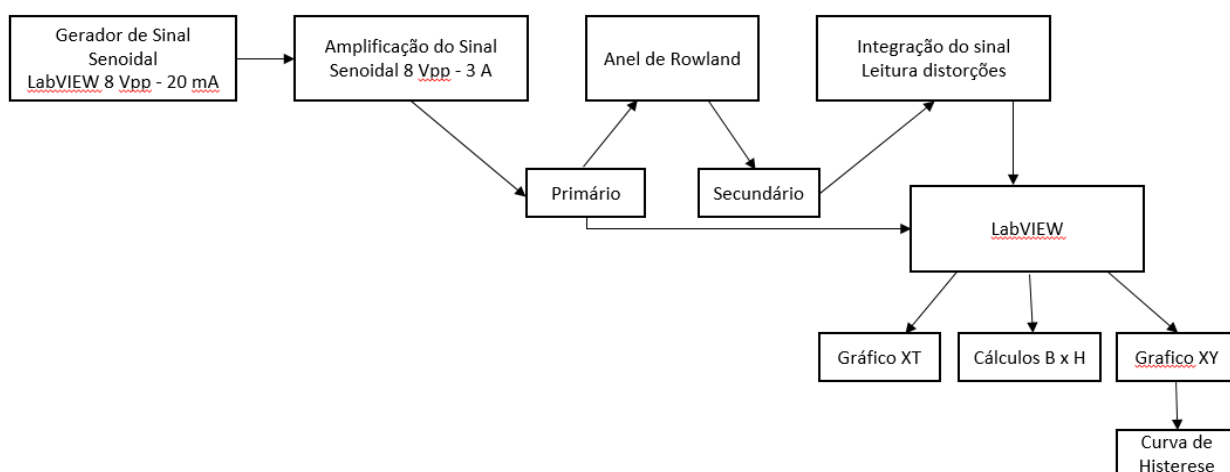
O circuito da Figura 11 é alimentado com um sinal de tensão contínua de 5 V de amplitude. Medindo-se a entrada inversora do amplificador operacional comparador, analisa-se uma onda quadrada, com *offset* de 2,5 V e 1 V de amplitude. Enquanto que na entrada não inversora é

medido um sinal de onda triangular com *offset* 1 V e 2 V de amplitude. Na saída do circuito, encontra-se uma onda quadrada de 1,5 V de amplitude. Com este exemplo, comprova-se que o PSIM é um excelente *software* de simulação de circuitos eletrônicos, no qual o usuário pode personalizar o circuito conforme sua necessidade, e assim, avaliar cada aspecto do sistema através de gráficos e valores numéricos.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como objetivo realizar um estudo do comportamento eletromagnético de diferentes tipos de materiais macios sinterizados, que são utilizados em núcleos de máquinas elétricas, como motores e transformadores. Dentre os aspectos mais importantes que são avaliados para cada material, estão as curvas de histerese, densidade de fluxo magnético e intensidade do campo magnético. Para tanto, desenvolveu-se um *hardware* e um aplicativo de instrumentação virtual dentro do *software* LabVIEW. A Figura 13 apresenta o fluxograma do processo de análise do material.

Figura 13 – Fluxograma do processo de análise do material



Fonte: Autor.

O aplicativo de instrumentação virtual desenvolvido no LabVIEW, gera um sinal senoidal de 8 Vpp e 20 mA. Este sinal é enviado a um circuito amplificador que entrega 8 Vpp e 3 A na saída. O sinal amplificado é então aplicado ao primário do anel de *Rowland* a ser

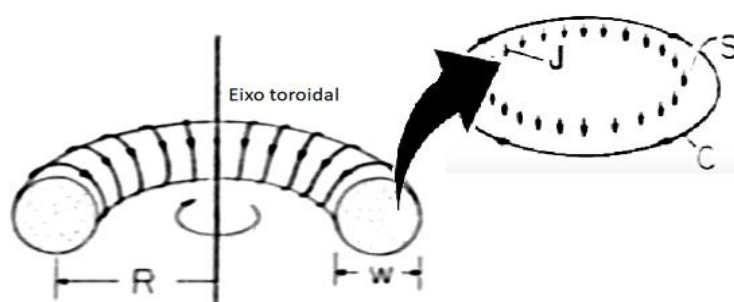
testado. Este mesmo sinal do primário é lido no canal 1, do bloco de entradas e saídas do LabVIEW, que envia o sinal para o aplicativo desenvolvido neste *software*. Na saída do secundário do anel é coletado o sinal e enviado a um outro circuito integrador, responsável por ler as distorções e enviar ao canal 2 do bloco de entradas e saídas, no qual será também enviado ao aplicativo do *software*. Este aplicativo recebe as informações do canal 1 e 2, bem como as informações do anel, que o usuário que realizará os testes deverá inserir manualmente, como número de espiras do primário e secundário, resistor utilizado no primário do anel, raio e diâmetro da circunferência do anel. Com estas informações o aplicativo mostra na tela do computador a curva de histerese e os valores da intensidade e densidade de campo magnético.

Nos próximos parágrafos serão apresentadas as deduções das equações envolvidas na curva de histerese, que foram inseridas dentro do aplicativo desenvolvido, o projeto do circuito para amplificar o sinal do gerador e ler as distorções do anel, o funcionamento e especificações técnicas do *software* LabVIEW, bem como seu bloco de entradas e saídas e placa de aquisição de dados, funcionamento do aplicativo programado no LabVIEW, funcionamento dos softwares de simulação FEMM e PSIM e validação da proposta.

3.1 Dedução das equações envolvidas na Curva de Histerese

A seguir será apresentada a dedução de todas as equações envolvidas na Curva de Histerese. Esta dedução foi desenvolvida a partir do material de Zahn (2012). A Figura 14 apresenta o esquemático do anel de Rowland, onde R representa o raio maior, w representa o diâmetro do raio menor, J representa o campo magnético, S a área da superfície e C a circunferência.

Figura 14 - Esquemático do anel de Rowland



Fonte: Adaptado de ZAHN (2012).

A partir da Figura 14 deduz-se a Equação 8 (ZAHN, 2012), que representa uma igualdade entre a integral de linha de H pela integral de superfície de J.

$$\oint H dS = \iint J dA \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

H Intensidade campo magnético máxima [A/m]

J Densidade de corrente elétrica [A/m²]

Desenvolvendo a Equação 8 chega-se na Equação 9 (ZAHN, 2012), que representa a intensidade de campo magnético máxima.

$$H2\pi R = N_1 I \rightarrow H = \frac{N_1 I}{2\pi R} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

I Corrente elétrica [A]

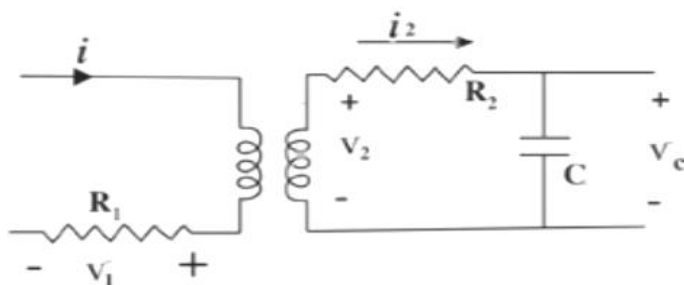
H Intensidade campo magnético máxima [A/m]

N₁ Número de espiras do primário

R Raio maior [m]

A densidade do campo magnético máxima é deduzida a partir da Figura 15, que representa o circuito equivalente de ligação do anel de *Rowland*.

Figura 15 – Circuito equivalente de ligação do anel de *Rowland*



Fonte: Adaptado de ZAHN (2012).

Desta forma, a tensão induzida no secundário é igual a taxa de variação da densidade de campo magnético multiplicado pela área do núcleo e pelo número de espiras no secundário, conforme apresenta a Equação 10 (ZAHN, 2012).

$$V_c = \frac{\partial B}{\partial t} \frac{\pi w^2}{4} N_2 \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

B Densidade do campo magnético máxima [T]

N_2 Número de espiras do secundário

V_c Tensão induzida no secundário [V]

w Diâmetro da circunferência do anel [m]

Desenvolvendo a derivada da Equação 10 e isolando a densidade de campo magnético máxima, obtêm-se a Equação 11 (ZAHN, 2012).

$$B = \frac{4 R_2 C}{N_2 \pi w^2} V_c \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

C Capacitor do integrador do secundário [F]

R_2 Resistor do integrador do secundário [Ω]

3.2 Projeto do circuito eletrônico

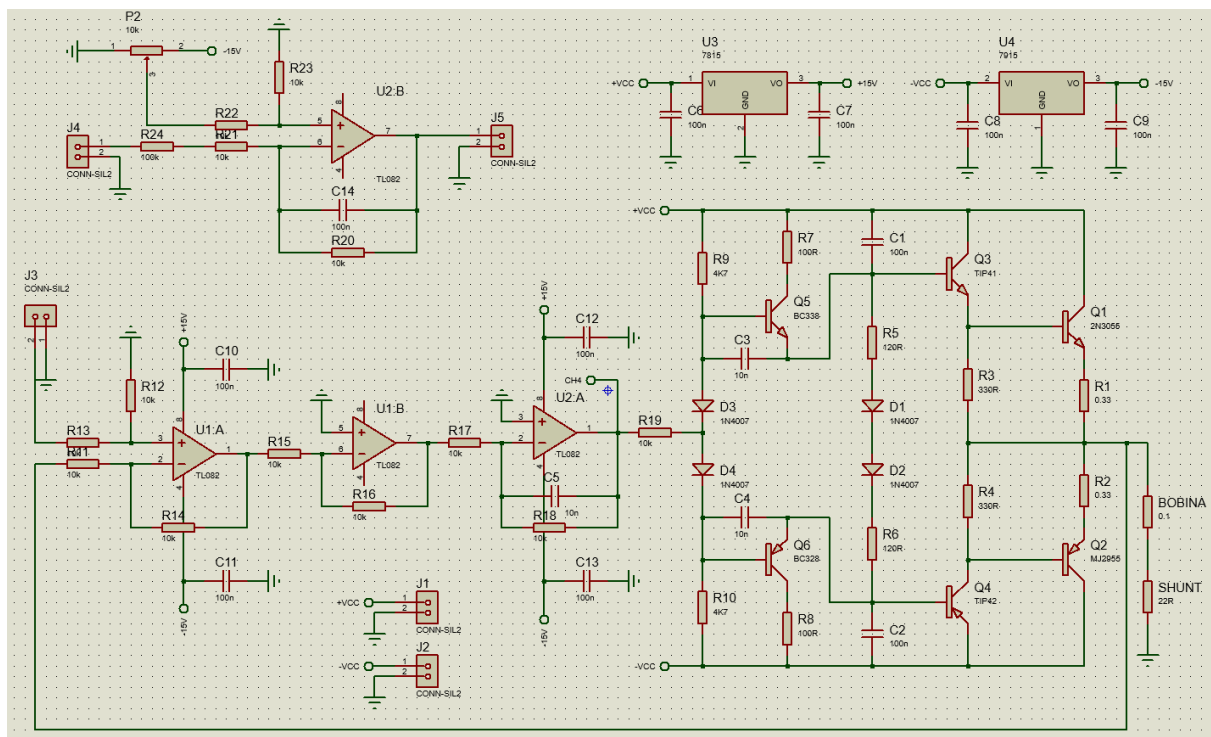
Desenvolveu-se um circuito eletrônico que lê um sinal senoidal de 8 V de 20 mA, gerado pelo LabVIEW, e amplifica na saída o mesmo sinal em 8 V e 3 A. O *hardware* conta com três amplificadores operacionais, sendo um diferenciador, um inversor e um integrador para garantir os 8 V na saída, responsáveis por garantir a realimentação do circuito.

Para amplificação da corrente, utilizou-se três estágios de *push pull*, com dois transistores em cada estágio, um NPN e outro PNP. Os transistores escolhidos para os estágios

1,2 e 3 respectivamente, foram BC338 e BC339, TIP41 e TIP42, N23055 e MJ2955. Estes transistores foram escolhidos em virtude de suas correntes de base e de coletor casarem com a corrente de base e coletor do estágio seguinte. As correntes de base e coletor de cada estágio são, respectivamente, 100 mA e 800 mA, 2 A e 6 A, 7 A e 15 A. O projeto foi dimensionado para até 15 A de corrente e 115 W de potência, porém como o circuito foi alimentado com duas fontes em configuração simétrica de + 24 V e – 24 V a 3 A de corrente máxima, o circuito apenas entrega a corrente máxima fornecida pela fonte de alimentação. Conectado ao primário do anel de *Rowland* utilizou-se um resistor shunt de potência, para controle da corrente do sistema, não permitindo que a corrente ultrapassasse o valor desejado.

Para leitura do sinal de tensão do secundário do anel, utilizou-se um amplificador operacional com a configuração integradora. Com um resistor de 10 k Ω e um capacitor de 100 nF interligados neste amplificador, garantiu-se a leitura esperada para este sinal. O circuito foi projetado no *Software* Proteus 8. Após o projeto do circuito, foi utilizada a técnica de fabricação de circuito impresso, para reproduzir o circuito em placa de fibra de vidro. A Figura 16 apresenta o esquemático completo deste circuito.

Figura 16 – Esquemático do circuito eletrônico

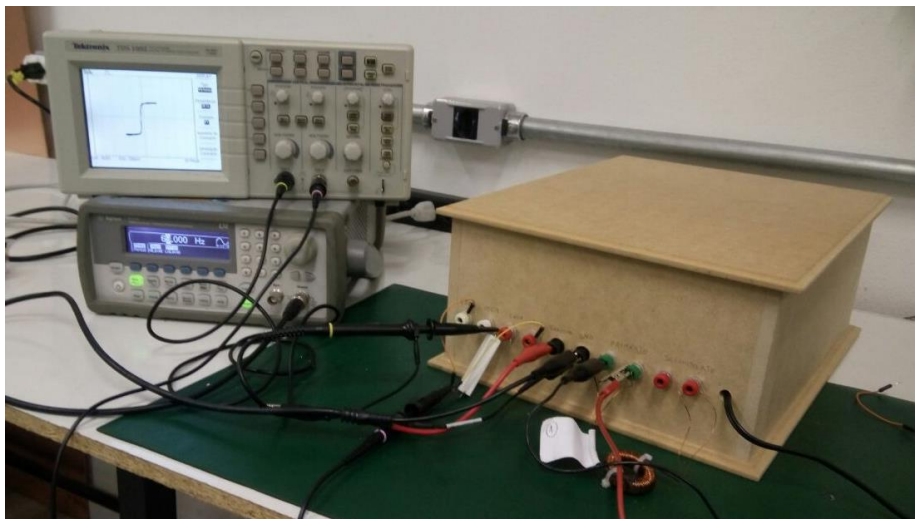


Fonte: Autor.

As Figura 17 e 18 apresentam respectivamente o projeto das trilhas e a placa de circuito impresso montada e soldada com os respectivos componentes eletrônicos.

Agilent, modelo 33220A, e posteriormente do gerador do LabVIEW; os fios terra, primário e secundário do anel de *Rowland*. A Figura 19 ilustra o projeto montado.

Figura 19 – Projeto montado em gabinete de madeira



Fonte: Autor.

3.3 Especificações técnicas do LabVIEW

A seguir serão apresentadas as especificações técnicas da placa de aquisição de dados e bloco de entradas e saídas do LabVIEW.

3.3.1 Placa de aquisição de dados

A placa de aquisição de dados utilizada neste projeto foi a PCIe-6341, da National Instrument, conforme apresenta a Figura 20. Abaixo seguem as especificações técnicas desta placa (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015):

- Entradas analógicas: 16
 - Resolução: 16 bits
 - Taxa de amostragem: 500kS/s
 - Faixa máxima de tensão: -10V a 10V
 - Escalas de medição: 4
 - Escala máxima: -10V a 10V
 - Precisão: 2,19 mV

- Escala mínima: -0,2V a 0,2V
 - Precisão: 60 μ V
- Saídas analógicas: 2
 - Resolução: 16 bits
 - Faixa máxima de tensão: -10 V a 10V
 - Precisão: 3,271 mV
 - Taxa de atualização: 900 kS/s
 - Drive de corrente: 5 mA
- Entradas e saídas digitais (bidirecionais): 24
 - Taxa máxima de *clock*: 1 MHz
 - Faixa máxima de tensão: 0 V a 5 V
 - Contadores: 4

Figura 20 - Placa de aquisição de dados modelo PCIe-6341



Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS (2015).

3.3.2 Bloco de entradas e saídas

Para o projeto foi utilizado um bloco blindado de entradas e saídas, modelo SCB-68, conforme retrata a Figura 21. O modelo possui 68 entradas e saídas, permitindo uma conexão de um circuito a um dispositivo. Abaixo seguem as especificações técnicas deste bloco. (NATIONAL INSTRUMENTS, Mar., 2009)

- Número de terminais: 68 (tipo parafuso)
- Tensão máxima de trabalho: 30 V_{rms}/42 V_{pp}/60 VDC

- Consumo de máximo de energia (+5 VDC, $\pm 5\%$): 800mA (alimentado pelo computador hospedeiro)

Figura 21 - Bloco de entradas e saídas modelo SC - 68



Fonte: NATIONAL INSTRUMENT (Mar., 2009).

Neste bloco, utilizou-se os cabos com conectores de analisador lógico com garras metálicas retráteis que são as pontas de prova dos instrumentos virtuais, desenvolvidas no trabalho de Barbosa (2016). Este autor identificou as ponteiras de prova de acordo com o terminal de conexão que representam nos instrumentos virtuais, conforme apresenta a Figura 22. Além disso, referente ao bloco SCB-68 o mesmo autor fixou uma etiqueta para identificação dos cabos. Os cabos utilizados possuem cerca de 30 cm de comprimento, medidos entre o bloco e as pontas de prova, e são de cores diferentes de modo que o usuário possa identificar no aplicativo as cores correspondentes ao terminal desejado.

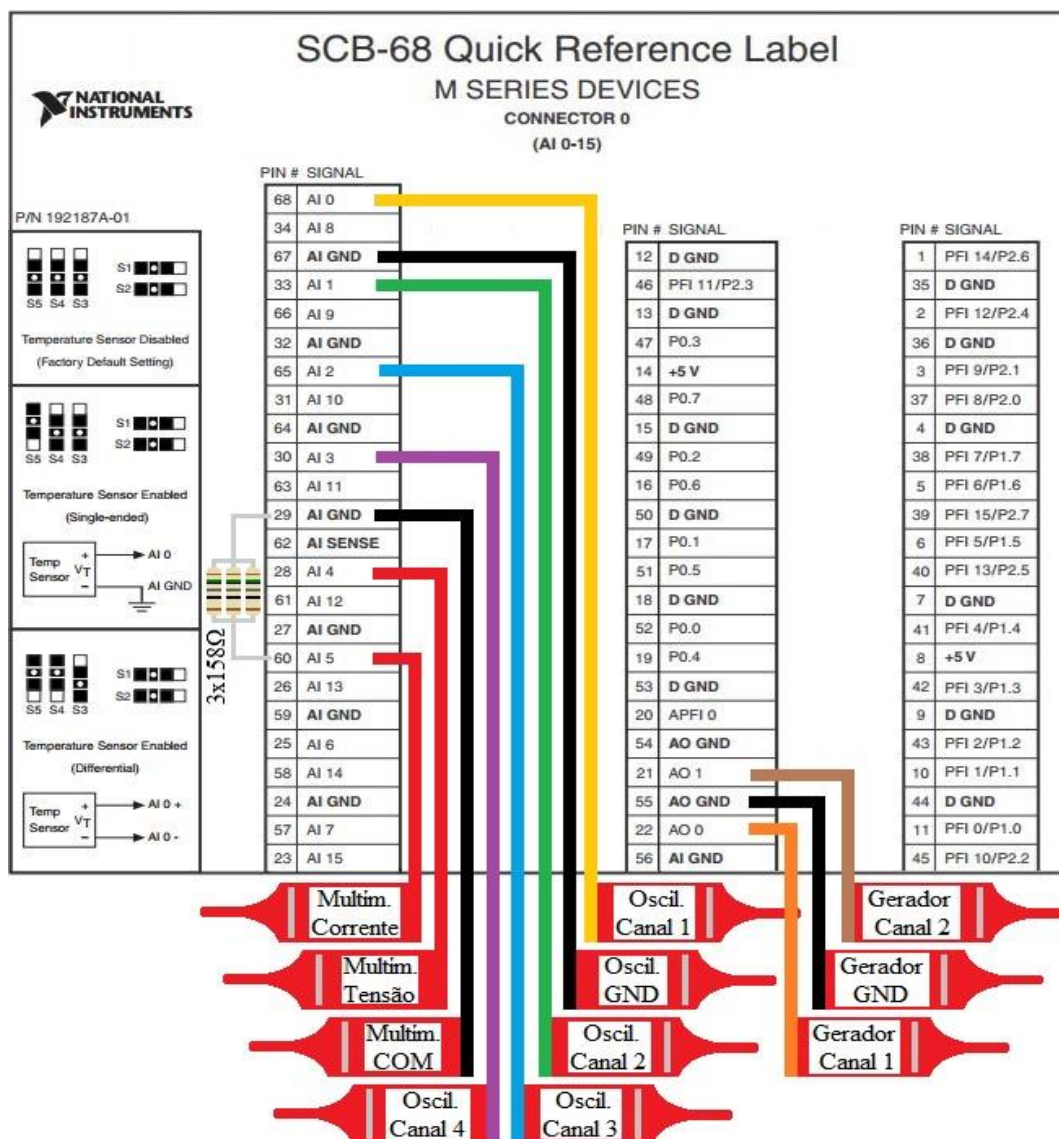
Figura 22 – Bloco de entradas e saídas



Fonte: Barbosa (2016).

A Figura 23 apresenta o esquema de ligação do módulo SCB-68 utilizada por Barbosa (2016). Nesta ligação utilizou-se apenas os cabos de osciloscópio de canal 1, canal 2 e terra, para fazer as ligações com o primário e secundário do anel, o gerador de sinais e terra, para geração do sinal aplicado no anel. Os outros conectores não foram utilizados.

Figura 23 - Esquema de ligação do módulo SCB-68



Fonte: Adaptado de NATIONAL INSTRUMENTS (Mar., 2009).

3.4 Funcionamento do aplicativo

Desenvolveu-se um aplicativo de instrumentação virtual no *software* LabVIEW. A taxa de amostragem utilizada foi de 25 mil amostras por segundo. Este aplicativo recebe os sinais analógicos de tensão do primário e secundário do anel a ser testado, lido a partir dos canais 1 e

2 do bloco de entradas e saídas do LabVIEW. O usuário insere no aplicativo o número de espiras do primário e secundário do anel, o raio e o diâmetro da circunferência do núcleo, bem como o valor do resistor ligado em série com a bobina do primário para limitação de corrente. Todos as unidades dos valores inseridos devem estar no Sistema Internacional de Medidas. Com estes dados, o aplicativo calcula os valores de intensidade de campo e densidade de campo magnético. Além disso, plota na tela do computador o gráfico da curva de histerese do material e a curva dos sinais do primário e secundário. A Figura 24 apresenta a tela do aplicativo.

Figura 24 – Aplicativo Histeresímetro



Fonte: Autor.

Tanto no gráfico da curva de histerese, quanto no gráfico das curvas do primário e secundário do anel inseriu-se as funções de ajustar as escalas X e Y. No gráfico das curvas do primário e secundário ainda é possível dar *offset* no sinal, ajustar quantos segundos por divisão o usuário deseja visualizar, acionar a função *Trigger*, posicionar cursores de tensão e de tempo e visualizar as medidas de frequência, amplitude, pico, pico a pico e tensão rms.

Outra funcionalidade implementada é a opção de exportar a curva de histerese gerada na tela do computador para o *software* de planilhas, como por exemplo o Excel. O usuário ativa na tela do *software* a opção “Exportar Excel” e a partir do momento que a luz indicadora da função estiver ligada, todos os dados referentes a curva de histerese serão enviados a um arquivo externo em formato “.lvm” que pode ser aberto em qualquer aplicativo de planilha eletrônica.

Além destas funções, inseriu-se um gerador de sinais de 1 mHz a 50 kHz de frequência e 0 a 10 V de tensão. Este gerador é capaz de gerar onda senoidal, quadrada, triangular, rampa e contínua. Ele ainda conta com a função *offset* e é capaz de gerar um ruído de 0 a 1 V. Este gerador ainda exibe na tela do aplicativo a forma de onda que está sendo gerada.

3.5 Funcionamento do *Software* FEMM

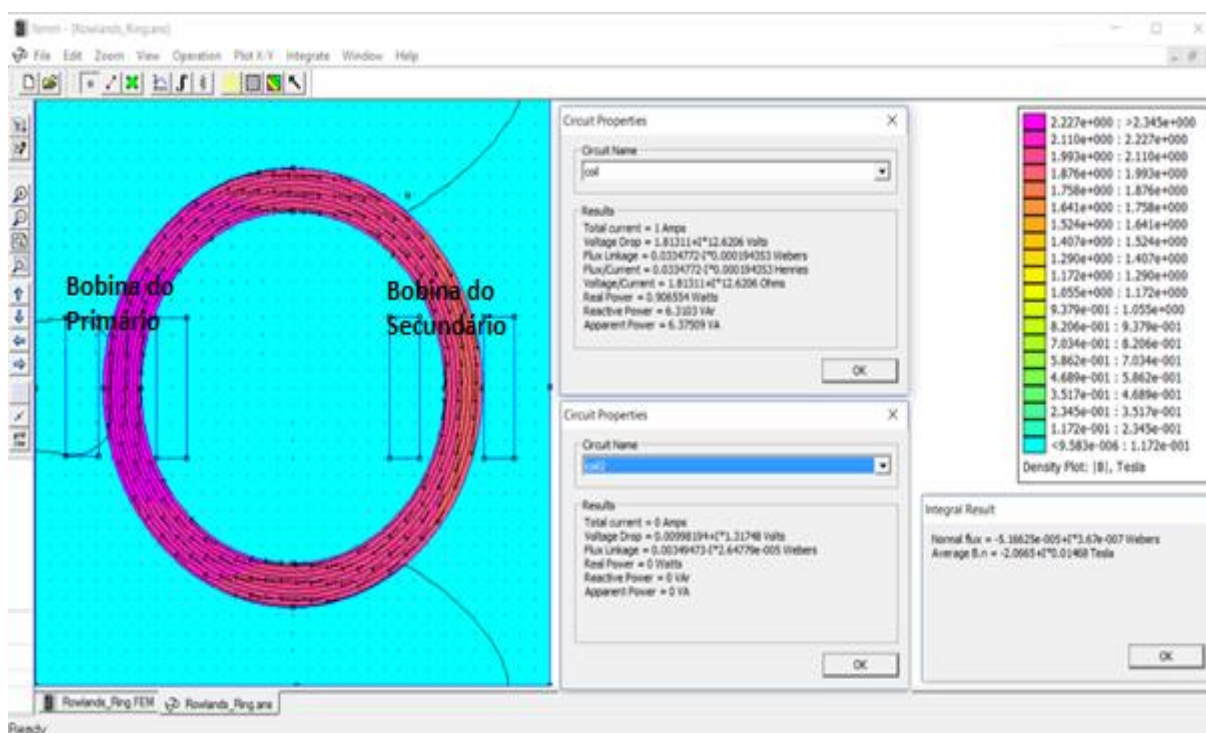
O FEMM 4.2, é um aplicativo gratuito de simulação de máquinas elétricas, que trabalha com elementos finitos. Para simulação de um problema de eletromagnetismo, como por exemplo um anel de *Rowland*, deve-se realizar os seguintes passos:

- Realizar o desenho do objeto de estudo;
- Definir os materiais que serão utilizados no objeto;
- Selecionar o material para cada parte do objeto, como por exemplo ferro, ar, aço, fio AWG;
- Definir a corrente que irá passar em cada segmento do objeto;
- Configurar as definições do problema, como por exemplo tipo de problema, unidade de medida, frequência, precisão, método de solução;
- Criar os nós para todas as malhas do sistema. Nesta etapa, o *software* divide o problema em um grande número de regiões em formato de triângulos com áreas conhecidas, assim o problema fica com resolução mais simples, tornando mais rápida e precisa a sua execução;

- Configurar o que será exibido na tela, por exemplo densidade magnética, campo magnético, densidade de corrente, ajustando as escalas das medidas conforme necessidade do usuário;
- Visualizar os resultados na tela do programa.

Caso o usuário deseje, é possível selecionar pontos específicos do objeto e traçar gráficos de densidade de fluxo magnético, intensidade de campo magnético e densidade de corrente elétrica. A Figura 25 ilustra a simulação de um anel de *Rowland* de material aço M-19, no qual foram realizados passos descritos acima.

Figura 25- Intensidade do campo magnético aplicado anel de *Rowland*



Fonte: Autor.

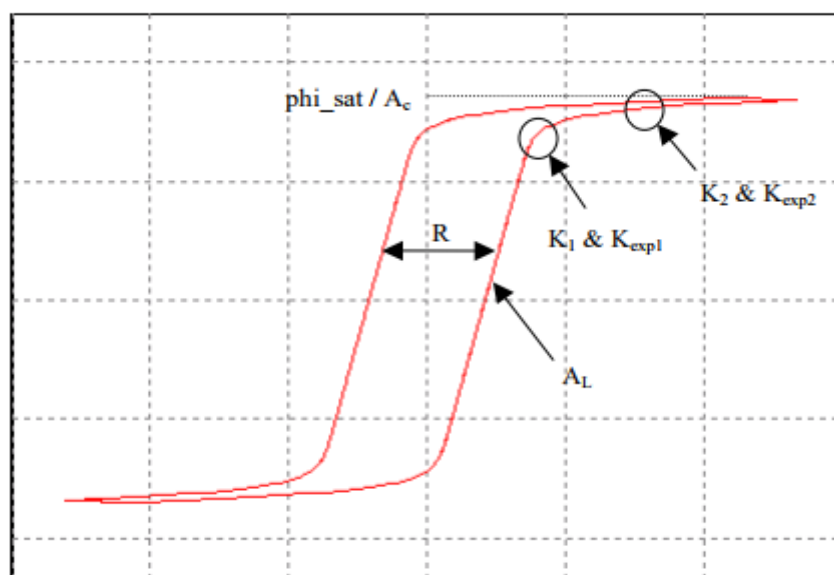
3.6 Funcionamento do Software PSIM

O PSIM 4.2 é um software de simulação de circuitos eletrônicos. A análise dos sinais de entrada e saída são semelhantes às encontradas na tela de um osciloscópio. Sendo assim, este *software* é capaz de simular milhares de circuitos diferentes. O circuito utilizado para simulação neste trabalho foi a análise do comportamento de um anel ferromagnético. O simulador apresentou a curva de histerese e os valores de campo magnético e densidade de fluxo magnético. Para simular um circuito semelhante a este, seguiu-se os seguintes passos:

- Realizar a montagem do circuito a ser estudado na tela do *software*;
- Ajustar os parâmetros de alimentação do circuito, como amplitude de tensão, frequência, ângulo de fase e tensão de *offset*;
- Ajustar os valores dos componentes envolvidos no sistema, como valor do resistor colocado em série com o primário e resistência do enrolamento do anel;
- Ajustar os parâmetros do anel. Abaixo seguem os parâmetros que devem ser configurados:
 - Fator de indutância A_L do material, medido em Henry;
 - Resistência interna R do material, medida em Ω ms;
 - Coeficiente de saturação ϕ do material, medido em Tesla;
 - Área da secção do núcleo A_c , medida em metros quadrados;
 - Número de voltas do primário e secundário;
 - Comprimento do circuito magnético, medido em metros;
 - Coeficiente K_1 , K_2 e K_{2exp} de saturação do material, medidos em Tesla;
 - Fluxo magnético inicial do material, medido em Tesla;
 - Corrente aplicada no primário.

A Figura 26 apresenta o gráfico da curva de saturação do material simulada neste aplicativo com todos os coeficientes que foram descritos acima. Observando esta curva e entendendo o que significa cada coeficiente, é possível inserir os parâmetros de forma correta no *software*.

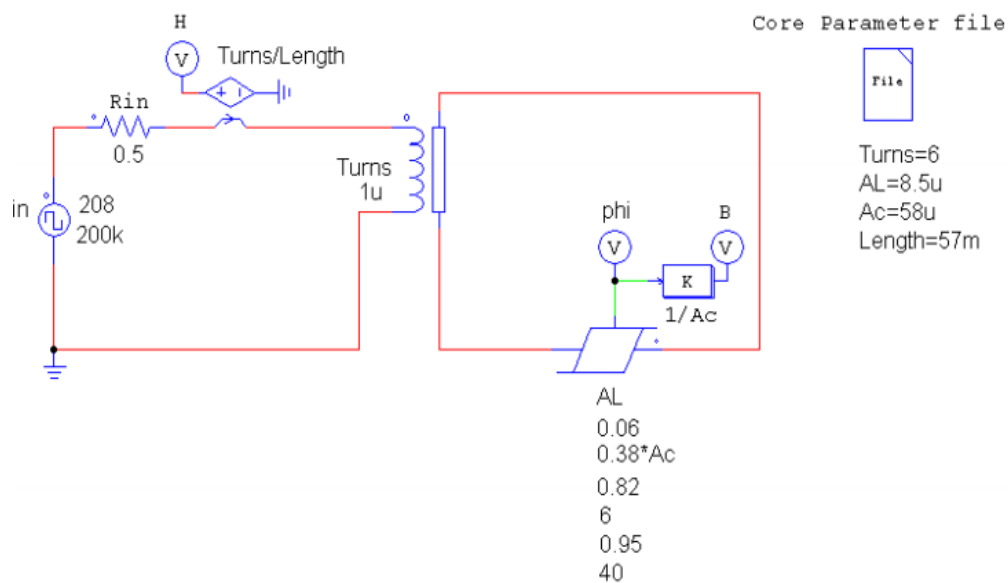
Figura 26 - Curva de saturação do material com seus coeficientes



Fonte: PSIM, 2006.

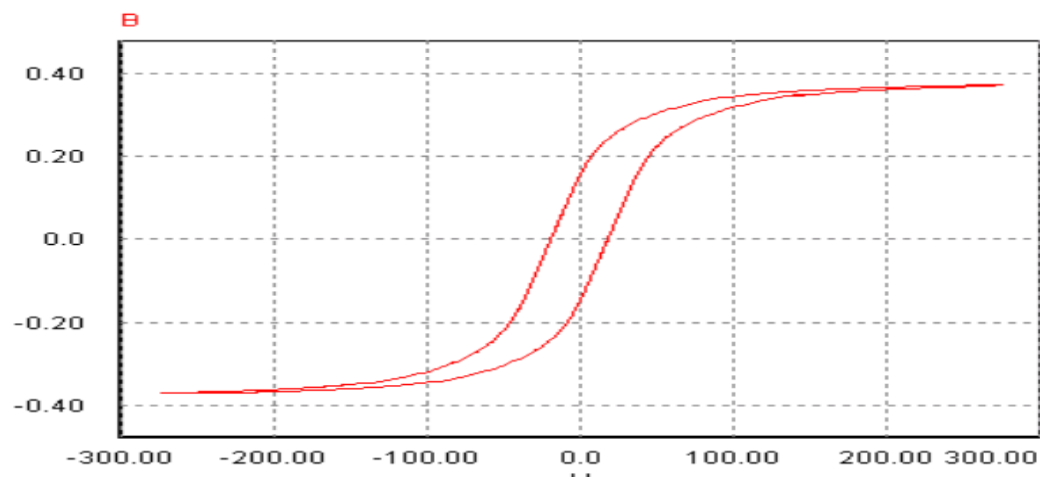
Ajustado todos os parâmetros o próximo passo é realizar a simulação. Para isto, clica-se no botão *Run Simulation* e seleciona-se as variáveis que serão exibidas na tela. Neste exemplo, selecionou-se a variável B (Densidade de fluxo magnético), que foi exibida no eixo Y em função do tempo (eixo X). Então, trocou-se o tempo do eixo X por H (Intensidade de campo magnético), desta forma, obteve-se a curva de histerese do material, bem como os valores de B e H. As Figuras 27 e 28 apresentam o esquemático do circuito montado e a curva de histerese obtida neste exemplo.

Figura 27 – Esquemático do circuito montado



Fonte: PSIM, 2006.

Figura 28 – Curva de histerese obtida



Fonte: PSIM, 2006.

3.7 Validação da proposta

A proposta foi validada através da comparação dos resultados dos materiais analisados via LabVIEW, FEMM e PSIM, como curvas de histerese, valores de campo magnético e densidade de fluxo magnético, com um traçador de curvas comercial da marca GLOBALMAG, modelo TLMP-FLX-D, conforme apresenta a Figura 29.

Figura 29 - Equipamento GLOBALMAG, modelo TLMP-FLX-D



Fonte: Autor.

As curvas obtidas com o aplicativo de instrumentação virtual, bem como as obtidas com o equipamento da GLOBALMAG, foram exportadas para uma planilha eletrônica de Excel e sobrepostas. Desta maneira verificou-se o erro padrão do equipamento desenvolvido neste trabalho. Os resultados obtidos nos *softwares* FEMM e PSIM serviram de modelo para conclusão da análise dos materiais testados.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nos testes realizados em 3 materiais diferentes. No primeiro material são apresentadas as simulações realizadas nos *softwares* FEMM 4.2 e PSIM 9.0, bem como os as tabelas com os resultados das curvas de histerese no aplicativo desenvolvido em LabVIEW e no equipamento de validação do sistema da fabricante GLOBALMAG. Já no segundo e terceiro material são apresentados apenas as curvas obtidas no aplicativo LabVIEW e no GLOBALMAG.

4.1 Material 1

A composição do material 1 é ferrite. Abaixo são apresentadas as especificações técnicas do anel de *Rowland* utilizando este material, bem como a corrente e a frequência do sinal senoidal aplicado no primário, a tensão lida no secundário, o capacitor e o resistor do circuito integrador.

- Composição do material: Ferro puro
- Número espiras primário: 64 espiras
- Número de espiras do secundário: 125 espiras
- Raio do anel: 0,015 m
- Diâmetro do núcleo: 0,0064 m
- Área da secção do núcleo: 0,0368 m
- Corrente aplicada no primário: 0,232 A
- Frequência do sinal senoidal: 60 Hz
- Tensão lida no secundário: 1,86 V

- Capacitor integrador: 100 nF
- Resistor integrador: 10 k Ω

A partir destas informações calcula-se a intensidade de campo magnético H máxima, medido em A/m e a densidade de fluxo magnético máxima, medido em T, utilizando-se, respectivamente, as Equações 9 e 11, representadas no capítulo 3 deste trabalho.

$$H = \frac{N_1 I}{2\pi R} = \frac{64.0,232}{2\pi.0,015} = 157,54 \text{ A/m}$$

$$B = \frac{4 R_2 C}{N_2 \pi w^2} V_C = \frac{4.10.10^3.100.10^{-9}}{125.\pi.0,0064^2} 1,86 = 0,45 \text{ T}$$

Desta forma, utilizando-se o aplicativo desenvolvido em LabVIEW obteve-se a curva de histerese do material. A Figura 30 apresenta a tela do aplicativo.

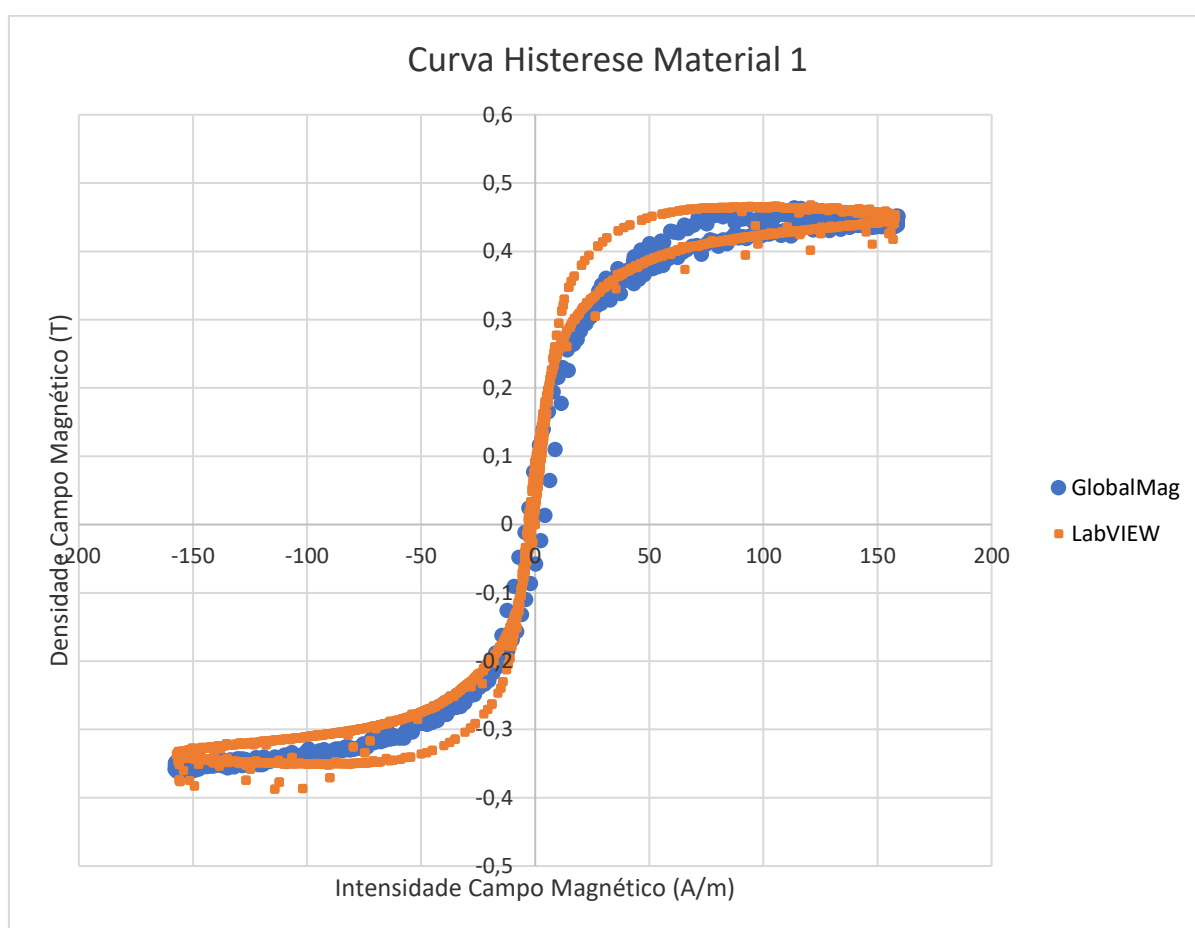
Figura 30 – Tela do aplicativo Histeresímetro para material 1



Fonte: Autor.

Nesta tela, observa-se a curva para um material mole, que satura com baixas correntes e possui a área do ciclo de histerese reduzida, da mesma forma que a perda de energia por ciclo, característica típica deste tipo de material. O aplicativo também apresenta os valores de H e B que condizem com os valores calculados anteriormente. Os valores de intensidade de campo magnético e densidade de fluxo magnético encontrados são coerentes com o material utilizado. Para validação desta curva, exportou-se a mesma para uma planilha eletrônica, onde inseriu-se a curva obtida com o equipamento traçador de curva de histerese da GLOBALMAG, fazendo-se uma sobreposição das duas curvas, conforme ilustra a Figura 31.

Figura 31 – Curva comparativa do material 1



Fonte: Autor.

Mensurou-se os valores de densidade de fluxo magnético remanescente (B_r), coercitividade do material (H_c), densidade de fluxo magnético máximo e intensidade de campo magnético máximo, tanto da curva obtida pelo equipamento GLOBALMAG quanto do

aplicativo do LabVIEW, afim de comparar os principais pontos das duas curvas, verificando sua veracidade, conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2 – Compartivo de B x H do material 1

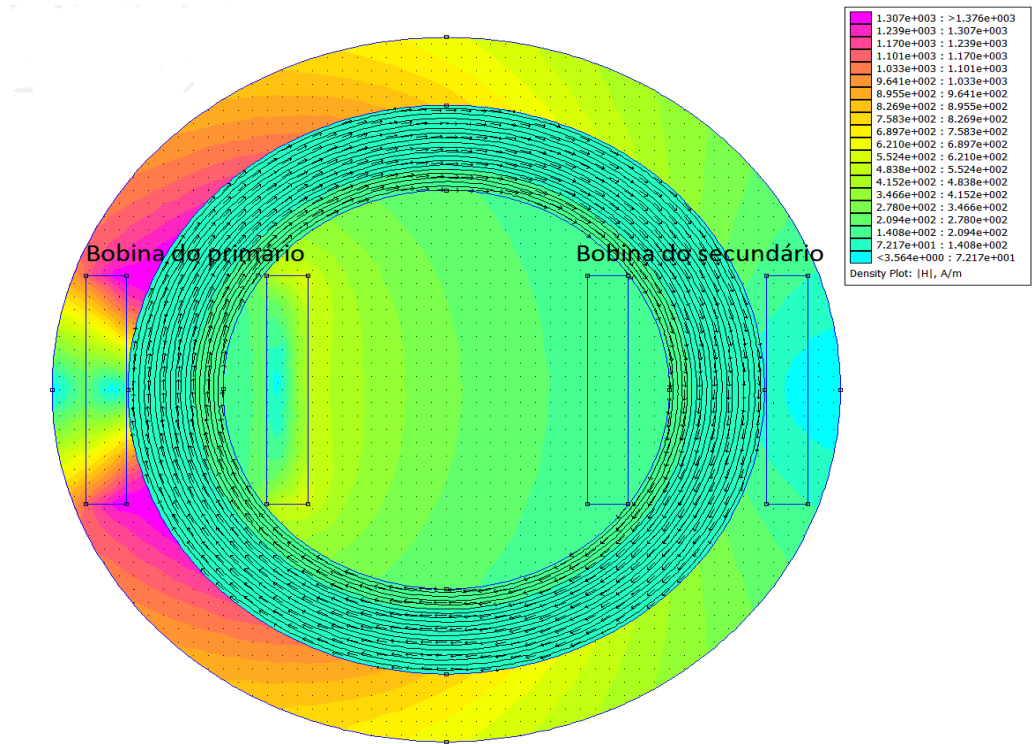
GLOBALMAG		LABVIEW		Erro (%)
Br	0,119	Br	0,111	6,723%
Hc	4,271	Hc	0,000	100,000%
Bmáx	0,463	Bmáx	0,468	1,079%
Hmáx	159,013	Hmáx	157,864	0,722%

Fonte: Autor.

Os valores calculados estão de acordo com os encontrados pelo aplicativo desenvolvido no LabVIEW e são validados pelos resultados obtidos a partir do traçador de curvas de histerese da GLOBALMAG, conforme apresentado na Tabela 2. A coercitividade do material obtida pelo LabVIEW é zero, enquanto que no equipamento padrão é 4,27 A/m. Isto se deve ao fato do *hardware* desenvolvido para aplicação possuir uma relação de capacitor x resistor no circuito de integração fixos. Caso pudesse variar esta relação utilizando-se um capacitor e um resistor variável, poder-se-ia calibrar o equipamento ajustando-se o valor da coercitividade. Esta limitação fica acentuada em função da corrente necessária para saturar o material ser muito baixa.

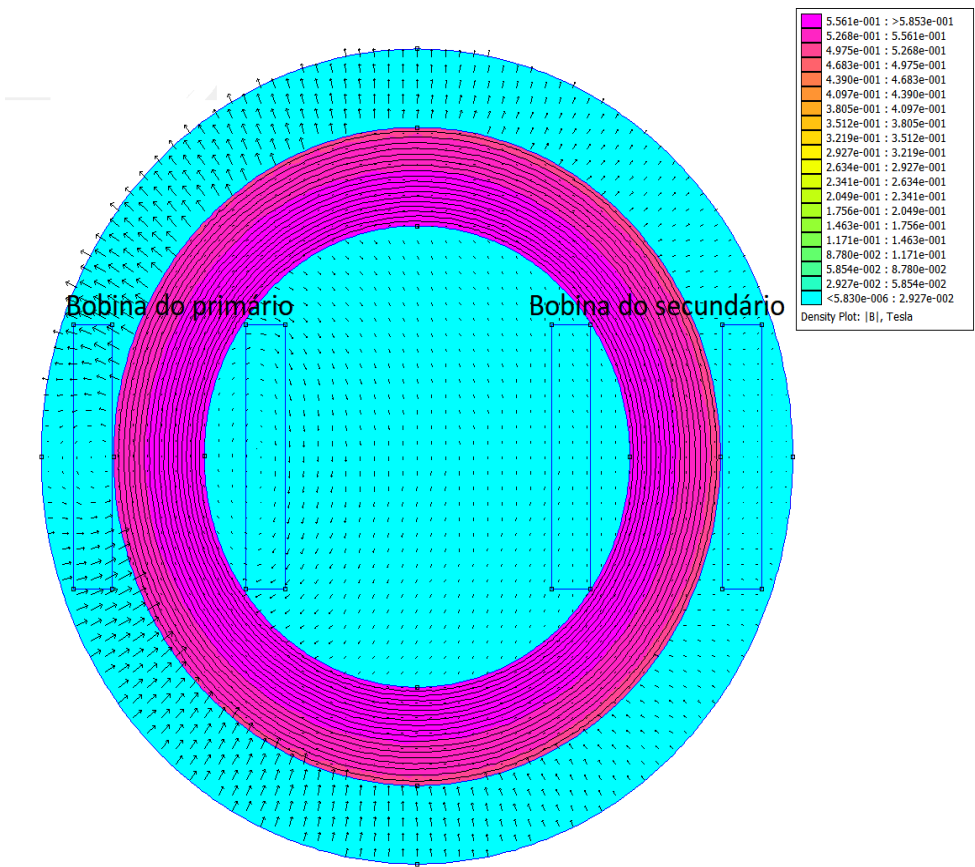
Com o *software* FEMM 4.2, desenhou-se o anel de *Rowland* utilizando-se das mesmas especificações técnicas do material e os mesmos valores de corrente e frequência aplicadas no primário do anel. As Figuras 32 e 33 ilustram, respectivamente, o comportamento do anel para intensidade de campo magnético H e densidade de fluxo magnético B.

Figura 32 – Comportamento do material 1 para H



Fonte: Autor.

Figura 33 – Comportamento do material 1 para B



Fonte: Autor.

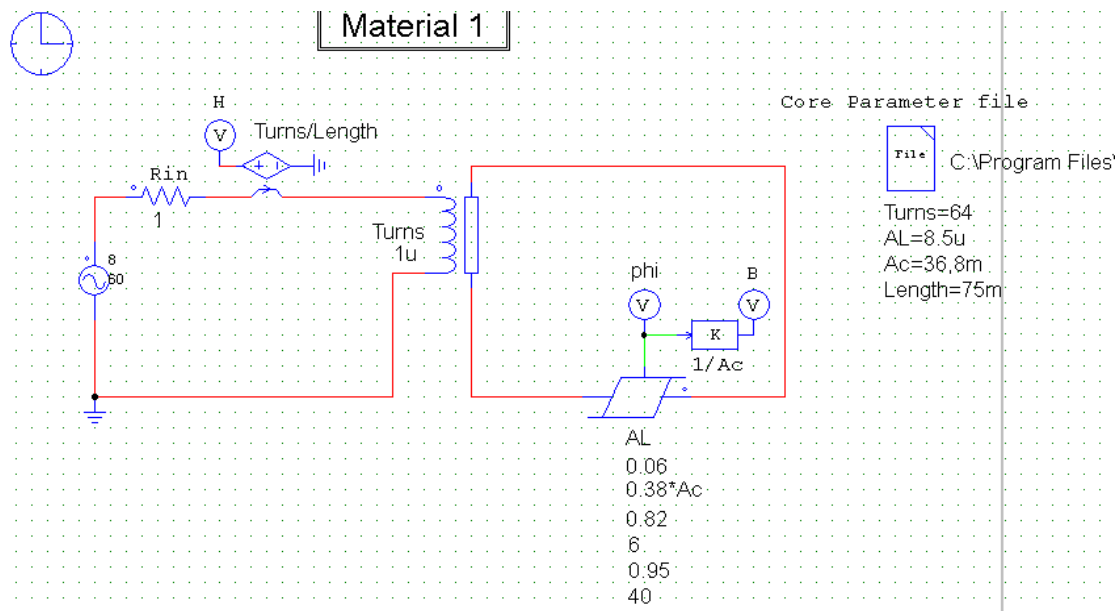
Abaixo apresenta-se os valores numéricos encontrados pela simulação.

- Corrente Total: 0,23 A
- Densidade de fluxo magnético: 0,468 T
- Fluxo magnético: 0,023 Wb
- Intensidade do campo magnético: 158,32 A/m
- Potência ativa: 0,151 W
- Potência reativa: 0,918 VAr
- Potência Aparente: 0,930 VA
- Tensão induzida no secundário: 1,86 V

A partir desta simulação verifica-se que a intensidade de campo magnético é bem mais intensa no lado do primário, onde é aplicada a corrente elétrica. As linhas de campo magnético se movimentam no sentido horário do núcleo, percorrendo uniformemente o material. Já densidade de fluxo magnético apresenta maior intensidade na superfície do núcleo, perdendo fluxo magnético à medida que se aproxima do interior do anel. As linhas de fluxo magnético formam um campo girante no primário do anel, induzindo fluxo ao secundário. Também se verifica que os valores numéricos de B e H condizem com os encontrados no aplicativo desenvolvido no LabVIEW, desta forma servindo também de validação a este trabalho.

Da mesma forma que no FEMM 4.2, utilizando-se o *software* PSIM 9.0, desenhou-se o esquemático do circuito eletrônico do anel de *Rowland*, com todas as especificações utilizadas até o momento para determinar a curva de histerese do material. Realizando-se comparações com as curvas obtidas no aplicativo desenvolvido em LabVIEW e no equipamento padrão da GLOBALBAL. A Figura 34 apresenta o esquemático do circuito desenhado no PSIM.

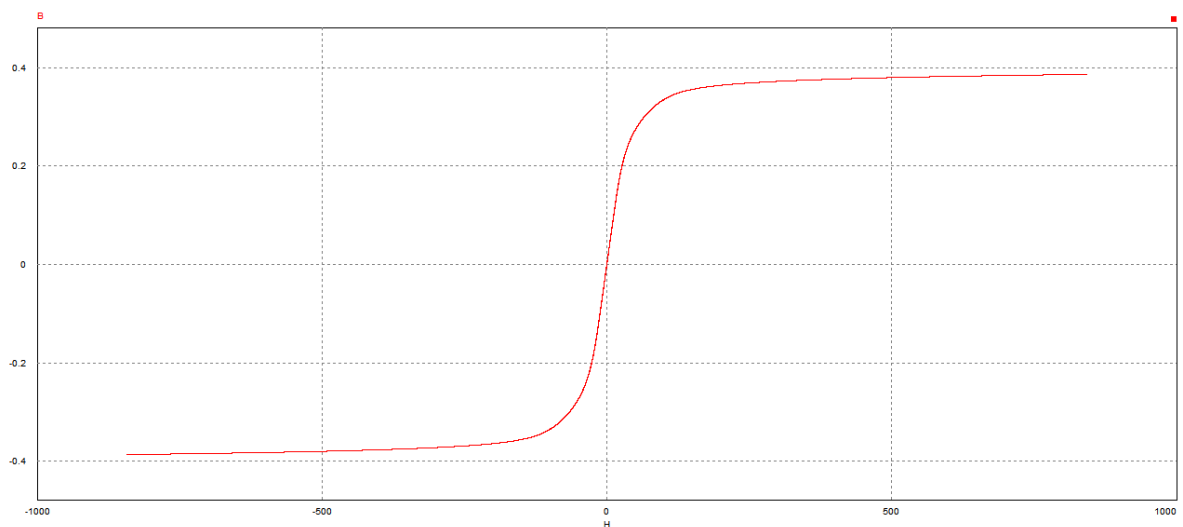
Figura 34 – Esquemático do circuito no PSIM do material 1



Fonte: Autor.

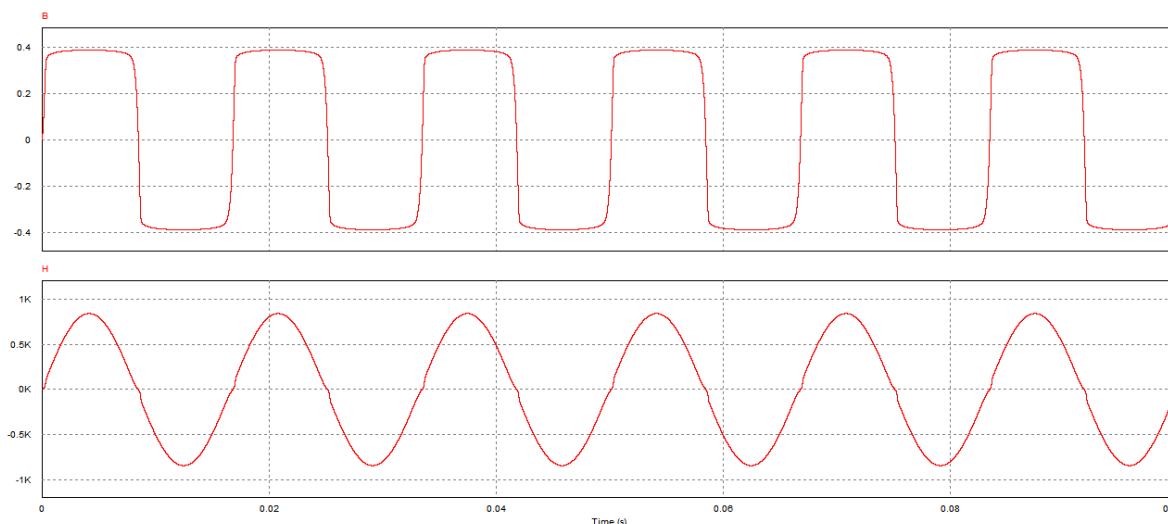
Executando-se a simulação do circuito acima obteve-se a curva de histerese do material ilustrada pela Figura 35 e a curva dos sinais lidos pelo primário e secundário do anel ilustrada pela Figura 36.

Figura 35 – Curva de histerese material 1 obtida no PSIM



Fonte: Autor.

Figura 36 - Curva dos sinais do primário e secundário do material 1 obtida no PSIM



Fonte: Autor.

Comparando-se as formas de ondas obtidas nesta simulação com as curvas obtidas na Figura 30, verifica-se a semelhança das mesmas. Tanto a curva de histerese quanto as curvas dos sinais lidos no primário e secundário do anel obtidas na simulação do PSIM são análogas às encontradas no aplicativo LabVIEW, reforçando a veracidade das mesmas.

4.2 Material 2

A composição do material 2 é ferro com 2 % de fósforo que faz parte da família Somaloy, patenteado pela Hognas. Abaixo são apresentadas as especificações técnicas do anel de *Rowland* utilizando este material, bem como a corrente e a frequência do sinal senoidal aplicado no primário, a tensão lida no secundário, o capacitor e o resistor do circuito integrador.

- Composição do material: Ferro 2% Fósforo (Fe2%P)
- Número espiras primário: 168 espiras
- Número de espiras do secundário: 290 espiras
- Raio do anel: 0,027 m
- Diâmetro do núcleo: 0,006 m
- Área da secção do núcleo: 0,030 m
- Corrente aplicada no primário: 1,60 A

- Frequência do sinal senoidal: 60 Hz
- Tensão lida no secundário: 4,27 V
- Capacitor integrador: 100 nF
- Resistor integrador: 10 kΩ

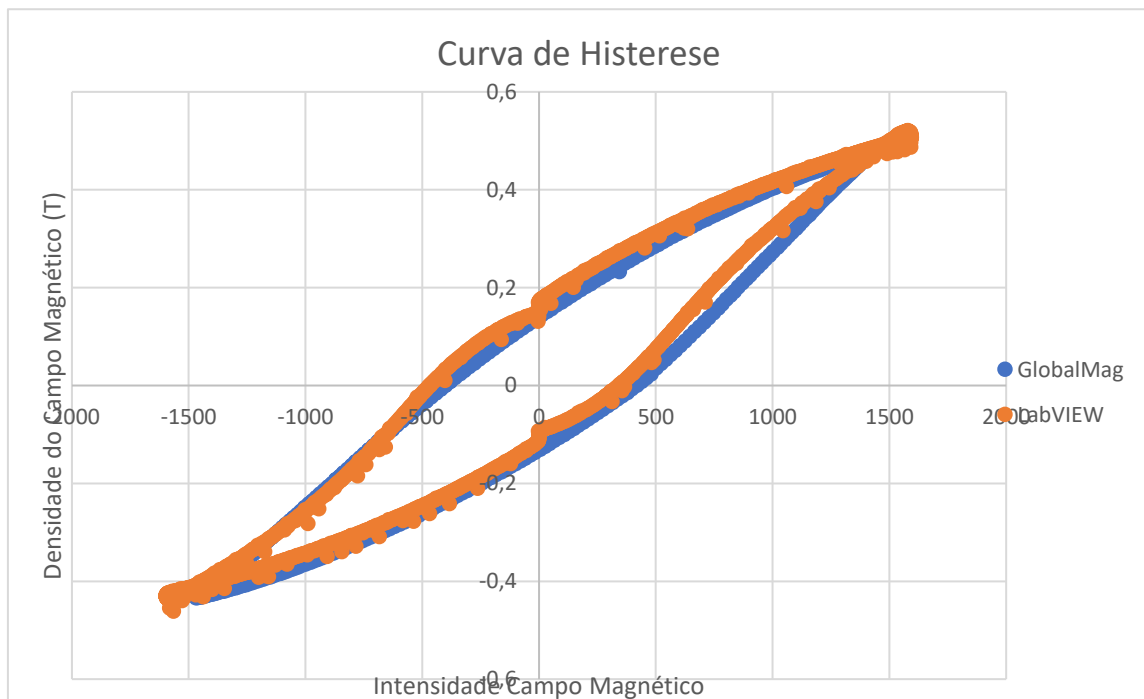
A partir destas informações calcula-se a intensidade de campo magnético H , medido em A/m e a densidade de fluxo magnético, medido em T, utilizando-se, respectivamente, as Equações 9 e 11, representadas no capítulo 3 deste trabalho.

$$H = \frac{N_1 I}{2\pi R} = \frac{168.1,60}{2\pi \cdot 0,027} = 1584,47 \text{ A/m}$$

$$B = \frac{4 R_2 C}{N_2 \pi w^2} V_C = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}{290 \cdot \pi \cdot 0,006^2} 4,27 = 0,52 \text{ T}$$

Para validação desta curva, exportou-se a mesma para uma planilha eletrônica, onde inseriu-se a curva obtida com o equipamento traçador de curva de histerese da GLOBALMAG, fazendo-se uma sobreposição das duas curvas, conforme ilustra a Figura 37.

Figura 37 - Curva comparativa do material 2



Fonte: Autor.

Mensurou-se os valores de densidade de fluxo magnético remanescente (Br), coercitividade do material (Hc), densidade de fluxo magnético máximo e intensidade de campo magnético máximo, tanto da curva obtida pelo equipamento GLOBALMAG quanto do aplicativo do LabVIEW, afim de comparar os principais pontos das duas curvas, verificando sua veracidade, conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3 – Compartivo de B x H do material 2

GLOBALMAG		LABVIEW		Erro (%)
Br	0,144	Br	0,151	4,861%
Hc	419,273	Hc	354,832	15,369%
Bmáx	0,474	Bmáx	0,521	9,915%
Hmáx	1421,012	Hmáx	1594,328	12,196%

Fonte: Autor.

Os valores calculados estão de acordo com os encontrados pelo aplicativo desenvolvido no LabVIEW e são validados pelos resultados obtidos a partir traçador de curvas de histerese da GLOBALMAG, conforme apresentado na Tabela 3. Verifica-se que a curva obtida a partir do material 2 é derivada de um material macio. Esta liga metálica da Hoganas possui uma curva de histerese de área pequena quando aplicadas frequências muito baixas, menores que 1 Hz. Entretanto, a 60 Hz a curva apresenta área maior. Isto se deve a composição do material, pois em frequências mais elevadas precisam de valores mais altos de campo magnético para se desmagnetizar, possuindo coercitividade elevada.

4.3 Material 3

A composição do material 3 é ferrite. Abaixo são apresentadas as especificações técnicas do anel de *Rowland* utilizando este material, bem como a corrente e a frequência do sinal senoidal aplicado no primário, a tensão lida no secundário, o capacitor e o resistor do circuito integrador.

- Composição do material: Ferro puro
- Número espiras primário: 100 espiras
- Número de espiras do secundário: 20 espiras

- Raio do anel: 0,014 m
- Diâmetro do núcleo: 0,01 m
- Área da secção do núcleo: 0,0196 m
- Corrente aplicada no primário: 0,70 A
- Frequência do sinal senoidal: 60 Hz
- Tensão lida no secundário: 4,27 V
- Capacitor integrador: 100 nF
- Resistor integrador: 10 kΩ

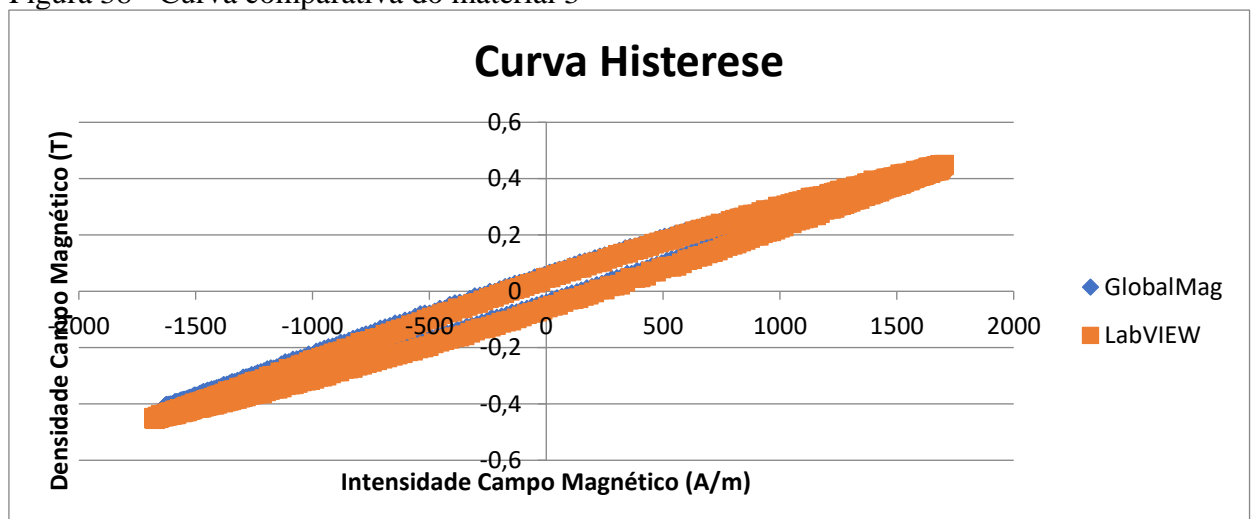
A partir destas informações calcula-se a intensidade de campo magnético H , medido em A/m e a densidade de fluxo magnético, medido em T, utilizando-se, respectivamente, as Equações 9 e 11, representadas no capítulo 3 deste trabalho.

$$H = \frac{N_1 I}{2\pi R} = \frac{100 \cdot 1,50}{2\pi \cdot 0,014} = 1702,77 \text{ A/m}$$

$$B = \frac{4 R_2 C}{N_2 \pi w^2} V_C = \frac{4 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-9}}{20 \cdot \pi \cdot 0,01^2} 0,70 = 0,449 \text{ T}$$

Para validação desta curva, exportou-se a mesma para uma planilha eletrônica, onde inseriu-se a curva obtida com o equipamento traçador de curva de histerese da GLOBALMAG, fazendo-se uma sobreposição das duas curvas, conforme ilustra a Figura 38.

Figura 38 - Curva comparativa do material 3



Fonte: Autor.

Mensurou-se os valores de densidade de fluxo magnético remanescente (B_r), coercitividade do material (H_c), densidade de fluxo magnético máximo e intensidade de campo magnético máximo, tanto da curva obtida pelo equipamento GLOBALMAG quanto do aplicativo do LabVIEW, afim de comparar os principais pontos das duas curvas, verificando sua veracidade, conforme apresenta Tabela 4.

Tabela 4 – Compartivo de B x H do material 3

GLOBALMAG		LABVIEW		Erro (%)
B_r	0,053	B_r	0,051	3,773%
H_c	194,132	H_c	190,412	1,916%
$B_{máx}$	0,431	$B_{máx}$	0,449	4,176%
$H_{máx}$	1624,044	$H_{máx}$	1702,767	4,847%

Fonte: Autor.

Os valores calculados estão de acordo com os encontrados pelo aplicativo desenvolvido no LabVIEW e são validados pelos resultados obtidos a partir traçador de curvas de histerese da GLOBALMAG, conforme apresentado na Tabela 4. Este material, assim como o material 1, é uma ferrite, possuindo características de materiais moles já mencionadas anteriormente. Porém como seu núcleo possui a área de secção duas vezes maior do que o material 1, a corrente para saturar o núcleo é elevada. A corrente de 700 mA, aplicada neste teste, não foi suficiente para saturação do mesmo. Porém aplicando a mesma corrente com o equipamento GLOBALMAG foi possível obter uma curva de histerese semelhante ao aplicativo desenvolvido.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, realizou-se a integração de diferentes ferramentas para estudar o comportamento eletromagnético de três materiais macios sinterizados, que são utilizados em máquinas elétricas, como motores e transformadores. Foi desenvolvido um *hardware* para amplificação e leitura dos sinais aplicados no primário e induzidos no secundário de um anel de *Rowland*. Através de uma interface com o LabVIEW, desenvolveu-se um aplicativo de instrumentação virtual capaz de analisar as curvas de histerese de diferentes materiais eletromagnéticos, como núcleos de transformadores sinterizados. Este aplicativo foi utilizado para fazer uma análise de diferentes materiais, onde comparou-se o comportamento de cada um.

Verificou-se as características magnéticas de cada material, como curva de histerese, densidade de fluxo magnético remanescente, densidade de fluxo magnético e intensidade de campo magnético. Concluindo-se que o material 1, a 60 Hz, satura com baixas correntes e possui a área do ciclo de histerese e a perda de energia por ciclo pequenas, resultados já esperados para este tipo de liga metálica. Já o material 2 a 60 Hz, a curva apresenta área maior. Isto se deve a composição do material, que em frequências mais elevadas, precisa de valores mais altos de campo magnético para se desmagnetizar, possuindo coercitividade elevada. Enquanto que o material 3, possui a área de secção do núcleo duas vezes maior do que o material 1, fazendo com que a corrente para saturar o núcleo seja elevada.

Além disso, utilizou-se os *softwares* FEMM 4.2 e PSIM 9.0 para determinar o comportamento eletromagnético do anel e as curvas de histerese. Aplicando estas simulações ao anel 1, conclui-se que a intensidade de campo magnético é bem mais intensa no lado do primário, onde é aplicada a corrente elétrica. As linhas de campo magnético se movimentam no sentido horário do núcleo, percorrendo uniformemente o material. Já a densidade de fluxo magnético apresenta maior intensidade na superfície do núcleo, perdendo fluxo magnético à

medida que se aproxima do interior do anel. As linhas de fluxo magnético formam um campo girante no primário do anel, induzindo fluxo ao secundário. Além disso, as curvas de histerese e os valores de densidade de fluxo magnético e intensidade de campo magnético são análogos aos encontrados pelo aplicativo desenvolvido no LabVIEW. Utilizando um equipamento de medição padrão da GLOBALMAG, modelo TLMP-FLX-D, validou-se todas as curvas geradas pelo aplicativo desenvolvido neste trabalho.

Em trabalhos futuros, a fim de calibrar o equipamento ajustando-se o valor da coercitividade para cada material testado, sugere-se que no *hardware* desenvolvido para amplificar os sinais aplicados no primário e ler as distorções do secundário dos anéis, seja substituído o capacitor e resistor fixos do integrador, por capacitor e resistor variáveis. Os resultados obtidos com o equipamento atual variam conforme as características eletromagnéticas dos materiais, frequência e corrente aplicada nos mesmos. Fazendo com que alguns tipos de resultados sejam mais exatos que outros, dependendo do material utilizado e do sinal que é aplicado nele. Inserindo-se o capacitor e resistor variável é possível melhorar a exatidão dos resultados, variando a relação RC do integrador. Além disso, orienta-se avaliar o produto energético máximo, para quantificar a dimensão do volume do material com o material macio, avaliando-se o erro com a maciez do material. Recomenda-se também, inserir uma programação no aplicativo do LabVIEW capaz de traçar a curva de magnetização do material. Esta curva é importante para determinação das características magnéticas dos materiais. Finalmente, sugere-se ainda realizar testes com outras ligas metálicas sinterizadas, de modo a avaliar o comportamento encontrado com as ferramentas propostas neste projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. F. **ABC do osciloscópio**. Princípio de funcionamento e estado da tecnologia. ISEP. 2007. Disponível em <http://www2.pcs.usp.br/~labdig/material/ABC_Osc.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2017.

ASM Handbook. **Powder Metal Technologies and Applications**. ASM International. v. 7, 1998.

BARBOSA, R. O. **Instrumentação virtual com LabVIEW em laboratório experimental de eletrônica**. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Controle e Automação. Centro Universitário Univates. Lajeado, Rio Grande do Sul, 2016.

BAGGIO FILHO, N. F. **Estudo e desenvolvimento de um atuador planar com enrolamentos planejados e núcleo de material ferromagnético compósito**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. UFRGS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2008. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/13791>>. Acesso em: 22 mai. 2017.

BIANCHINI, D., et al. **O ensino de engenharia por meio de laboratórios virtuais de eletrônica: uma reflexão entre a montagem no protoboard e a simulação**. Anais do XXXIV COBENGE. Passo Fundo, Set. 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242676686_O_ENSINO_DE_ENGENHARIA_PO_R_MEIO_DE_LABORATORIOS_VIRTUAIS_DE_ELETRONICA_UMA_REFLEXAO_ENTRE_A_MONTAGEM_NO_PROTOBOARD_E_A_SIMULACAO>. Acesso em: 19 mai. 2017.

BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

BONATO, M. M. **Resistência à Corrosão do Aço ABNT 316L Injetado Sinterizado**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2003.

CALLISTER, W. D. **Materials Science and Engineering**. 7ª ed. John Wiley & Sons, Inc. USA, 2007.

CAMPOS, L. et al. **Caracterização das propriedades magnéticas de materiais compósitos magnéticos macios**. Revista de Iniciação Científica. ULBRA. São Leopoldo, Rio Grande do

Sul, 2014. Disponível em: <<http://www.periodicos.ulbra.br/index.php/ic/article/viewFile/1032/969>>. Acesso em: 28 mai. 2017.

CERVA, L. L. **Desenvolvimento de uma máquina síncrona com imãs permanentes e núcleo sintetizado utilizada em aerogerador**. Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2014.

CULLITY, B. **Introduction of Magnetic Materials**. USA; Massachusetts, 1967.

DIAS, M. M., SCHAEFFER, L., DIAS, A. M., CÉSAR, J. L. **Novas Perspectivas das Máquinas Elétricas Trifásicas a Partir da Utilização de Materiais Magnéticos Macios Sinterizados**. Novo Hamburgo: Revista Liberato, v. 6, n. 6, 2005. p. 56-65.

DIAS, M. M., et al. **Aplicação de materiais magnéticos macios sintetizados em máquinas elétricas rotativas síncronas**. 2014. Tecnologia e Tendências. FEEVALE. Vol 10, Nº2, 2º Semestre, Novo Hamburgo, 2014.

ELETROBRÁS. **Motor elétrico: guia básico**. Distrito Federal, Brasília, 2009.

EPUSP. **Introdução à Eletromecânica e à Automação**. Transformadores Teoria. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo – São Paulo – 2014. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/349452/mod_resource/content/2/Transformadores_Teo_2014%20%281%29.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2017.

FITZGERALD, A. E., et al. **Eletric Machinery**. EUA; Nova York. McGraw-Hill, 1990.

FERREIRA, C. A. **Desenvolvimento de núcleos para transformadores monofásicos de baixa potência**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. UFRGS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2011.

FERREIRA, R., et al. **Virtualização de instrumentos industriais utilizando o LabVIEW**. Dept. de Eng. Elétrica e Sistemas de Potência, UFPE – Universidade Federal de Pernambuco. VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais – Induscon. Ago. 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/267965547_VIRTUALIZACAO_DE_INSTRUMENTOS_INDUSTRIAIS_UTILIZANDO_O_LABVIEW>. Acesso em: 12 mai. 2017.

GOMES, I. S. F., et al. **PSIM**. Programa de Educação Tutorial. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Ceará, 2014. Disponível em: <http://www.peteletrica.ufc.br/wp-content/uploads/2016/PSIM%20-%20Finalizado.pdf>. Acesso em: 20 set. 2017.

GRIFFITHS, D. J.; COLLEGE, R. **Introduction to Electrodynamics**. USA; New Jersey, v. 4, 2012.

GUSSOW, M. **Basic Electricity**. USA; New York, McGraw-Hill, 1990.

HILLEBRANDS, B.; OUNADJELA, K. **Spin Dynamics in Confined Magnetic Structures**. Alemanha; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, v. I, 2002.

HOGANAS, A. B. **Compostos Magnéticos Macios (Soft Magnetic Composites - SMC)**. Disponível em: <<https://www.hoganas.com/>>. Acesso em: 28 mai. 2017.

HULTMAN L.O.; JACK A.G. **Soft magnetic composites - motor design issues and applications**. Proceedings of the International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, p. 194-204, Princeton, NJ, USA. 2004.

KATZ, R. **Physics, Magnetic Properties of Matter**. Chapter 33. University of Nebraska. EUA; Lincoln, 2005.

KOSOW, I. L. **Electrical Machinery and Transformers**. EUA; Nova Jersey, 1990.

LOPES, V. J. S. **Instrumentação Virtual Aplicada ao Ensino Experimental de Engenharia Elétrica**. Dissertação de mestrado, São Paulo, 2007. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-09012008-150802/pt-br.php>>. Acesso em 22 mai. 2017.

LUDKE, E. **Estudando campos magnéticos e histerese com um anel de Rowland**. Departamento de Física. UFSM. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2010.

LUNA, W. H. D. **Desenvolvimento de ímãs de Nd-Fe-B pelo processo MPI – aplicados em máquinas elétricas (motores)**. Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2012.

MORAIS, E., et al. **Evolução dos laboratórios experimentais de engenharia elétrica: premissas para o ensino à distância e pesquisa corporativa**. Revista Visão Universitária v.1, n.1. 2014. Disponível em: <<http://www.visaouniversitaria.com.br/ojs/index.php/home/article/view/27/18>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

NASAR, S.A. **Handbook of Electric Machines**. EUA; Nova York, McGraw-Hill, 1987.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Instrumentação Virtual**. Nov. 2009. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/4752/pt/#toc3>>. Acesso em: 10 mai. 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI 6341 Device Specifications**. 2015. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/374566c.pdf>>. Acesso em: 10 mai. 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **SCB-68 User Manual for Advanced Functions**. Mar. 2009. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/manuals/372551a.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Vantagens da utilização do LabVIEW em pesquisas acadêmicas**. Fev. 2012. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/8534/pt/>>. Acesso em: 12 mai. 2017.

NIADA, R. F., et al. **Simulação de um motor elétricos em que o estator foi substituído por materiais produzidos com processo de metalurgia do pó**. 2015. Revista Conhecimento Online. Novo Hamburgo, a. 7, v. 2, 2015.

NOGUEIRA, A. F. L.; PEREIRA JR, D. C. B. **Design optimization of actuator-type devices operating under magnetic saturation**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Campina Grande, 2006.

PADILHA, A. F. **Materiais de Engenharia Microestrutura e Propriedades**. Hemus. Curitiba, Paraná, 2000.

PIECZKOSKI, R. **Instrumentos Virtuais Baseados no LabVIEW e Placa de Som**. Universidade de Passo Fundo, 2015. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/17790741-Universidade-de-passo-fundo.html>>. Acesso em: 15 mai. 2017.

PSIM. **Tutorial on How to Define the Saturable Core Element**. Powersim Inc. 2006. Disponível em: www.powersimtech.com. Acesso em: 24 set. 2017.

RIGO, J. **Relatório Final**. UPF. Passo Fundo, Rio Grande do Sul, 2012.

RONCHI, F. P. **Construção e análise do desempenho de um motor de corrente contínua utilizando materiais magnéticos macios a partir da metalurgia do pó**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais. UFRGS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2015.

SAY, M. G. **Alternating Current Machines**. 5ª. ed. Great Britain: Longman Scientific & Technical, 1983.

SCHAEFFER, L., et al. **Estudo comparativo de ligas magnéticas através de simulação por elementos finitos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

STOLL, R. L. **The analysis of eddy currents**. Oxford: Clarendon Press, 1974.

TICHLLEN, P. et al. **Distribution and power transformers**. VITO – Vision on technology. Tóquio, Japão, 2011. Disponível em: <https://www.ebpg.bam.de/de/ebpg_medien/entr2/402_studyf_11-01_part1-7.pdf#search>. Acesso em: 29 abr. 2017.

ZAHN, M. et al. **Electromagnetic Fields and Energy**. MIT Open Course Ware. Massachusetts Institute of Technology. Massachusetts, EUA, 2012. Disponível em: <https://ocw.mit.edu/resources/res-6-001-electromagnetic-fields-and-energy-spring-2008/>. Acesso em: 09 set. 2017.

APÊNDICE A – DIAGRAMAS DE BLOCOS DESENVOLVIDOS NO LABVIEW

Diagrama de blocos da calculadora de intensidade e densidade de campo magnético do histeresímetro:

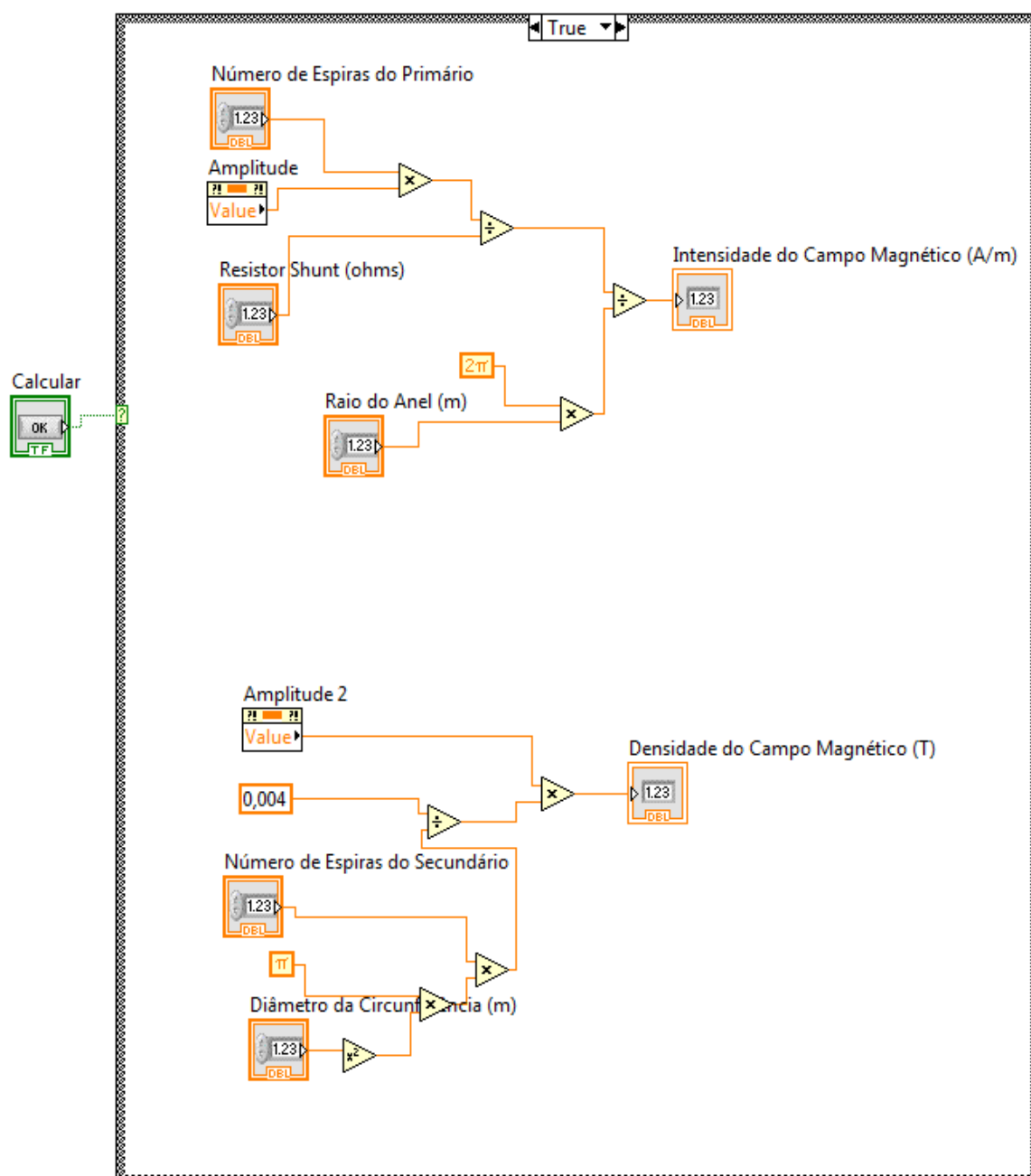


Diagrama de blocos dos osciloscópios XT e XY do histeresímetro:

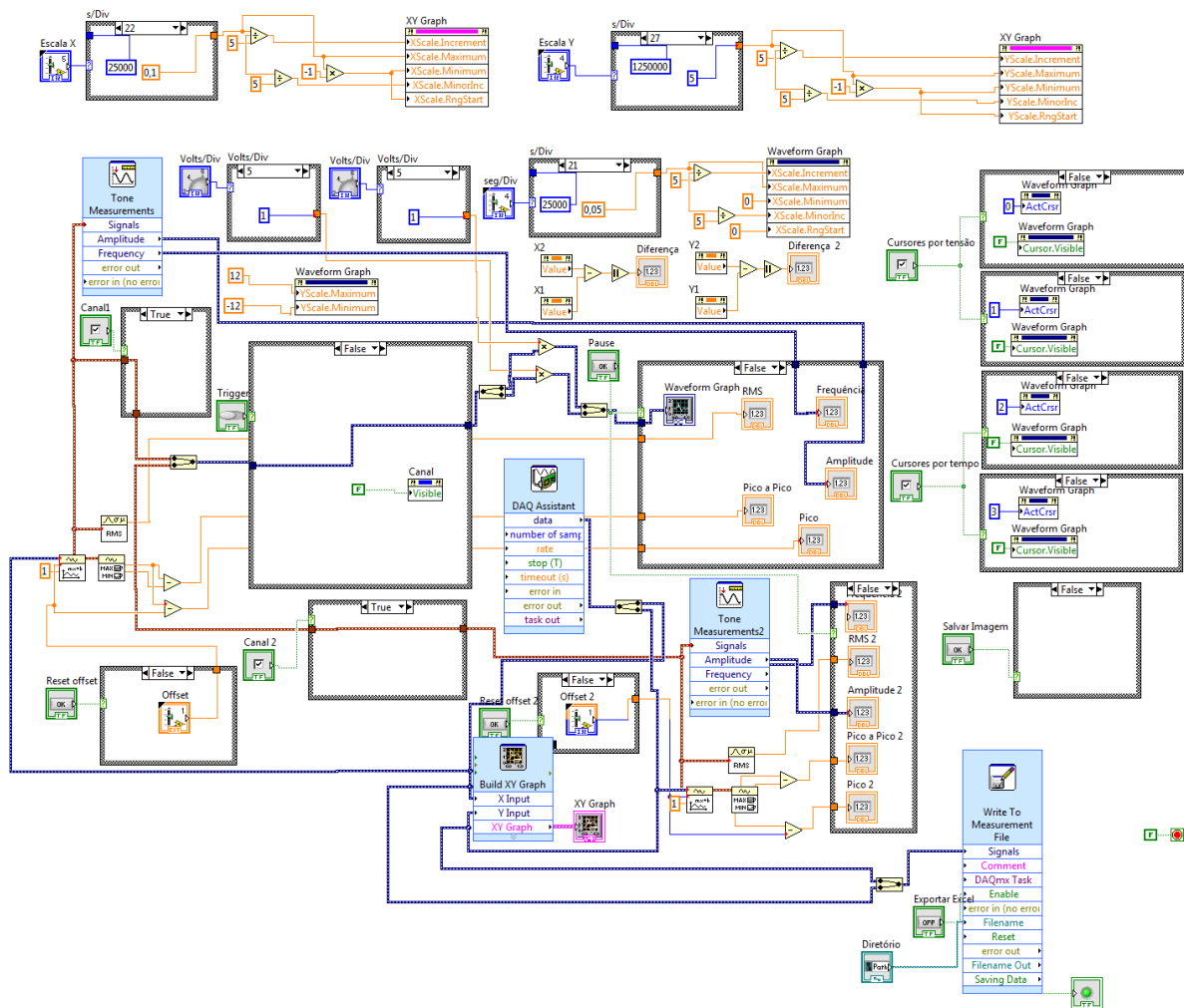
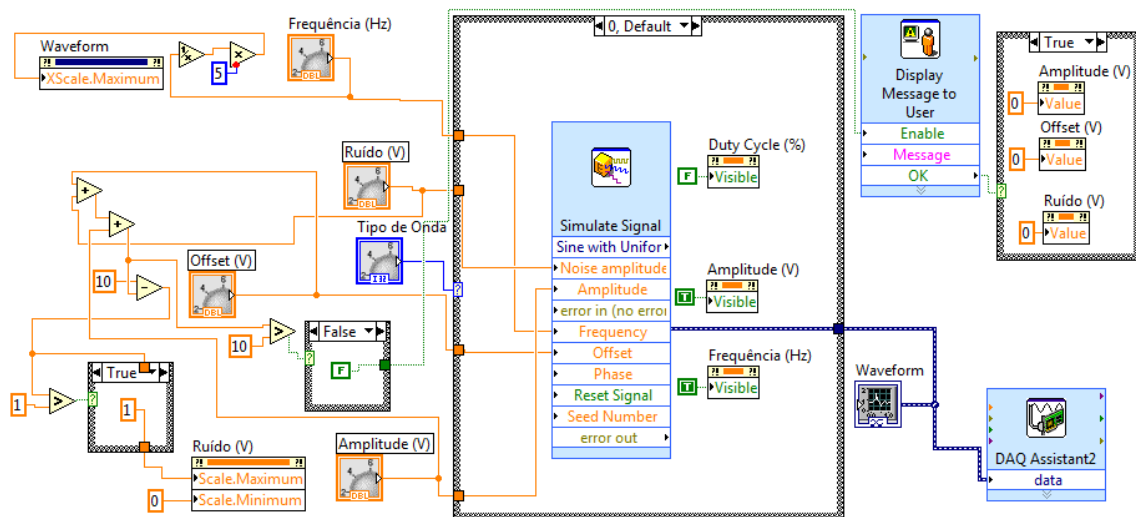


Diagrama de blocos do gerador de sinais do histeresímetro:

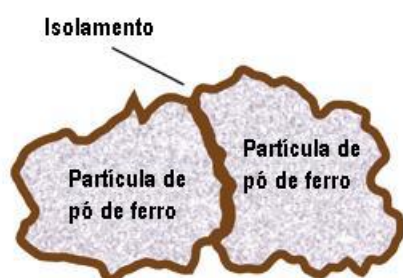


APÊNDICE B – MATERIAL SMC

Os materiais compósitos magnéticos macios (SMC) são materiais com propriedades eletromagnéticas e que possuem dois ou mais elementos em sua composição. Sua fabricação é via metalurgia do pó. (BAGGIO FILHO, 2008)

Estes materiais são gerados de minúsculas partículas de pó de ferro cobertas por um material dielétrico, que produz isolamento elétrico aos grãos conforme apresenta Figura 39. O pó de ferro é misturado com material dielétrico e lubrificante, como fósforo por exemplo.

Figura 3939 – Representação esquemática do SMC



Fonte: HULTMAN (2004).

Esta mistura é colocada em uma matriz e então compactada para gerar peças de material ferromagnético. O método utilizado para compactação é a prensagem axial numa matriz de aço. Após este processo, o material é levado a um forno para fazer com que os grãos de ferro se misturem ao material dielétrico. Recomenda-se a utilização destes materiais para construção de núcleos de equipamentos eletromagnéticos sujeitos a campos magnéticos variáveis, por estes materiais possuírem isotropia magnética e alta resistividade elétrica. (CAMPOS, 2014; HOGANAS, 2017)

As características dos compósitos magnéticos macios apresentam diferenças mecânicas e eletromagnéticas dos materiais ferromagnéticos convencionais. O fluxo magnético é o mesmo em todas as dimensões do material. Comparando-se o SMC com o aço laminado verifica-se que a permeabilidade relativa no SMC é bem inferior ao aço laminado. Isto acontece porque o fluxo magnético tem que passar pelo material isolante que não é ferromagnético. Já as perdas por ciclo de histerese são maiores no SMC, enquanto que as perdas por correntes parasitas são maiores no aço laminado. Pelas perdas por correntes parasitas no SMC serem menores este material trabalha melhor em altas frequências. (RONCHI, 2015)